

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA

FERRO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO ESTADO DA BAHIA: uma avaliação
preliminar dos fatores influentes na concentração

José Carlos Cruz do Carmo

Salvador
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA

**FERRO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO ESTADO DA BAHIA: uma avaliação
preliminar dos fatores influentes na concentração**

José Carlos Cruz do Carmo

Dissertação apresentada ao mestrado em
Engenharia Ambiental Urbana como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE EM
ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA

Orientador: Profa. Dra. Iara Brandão de Oliveira

Salvador

2016

Sistema de Biblioteca UFBA

Carmo, José Carlos Cruz do.

Ferro na água subterrânea do Estado da Bahia: uma avaliação preliminar dos fatores influentes na concentração. / José Carlos Cruz do Carmo. – 2016.
123 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Iara Brandão de Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2016.

1. Águas subterrâneas – Bahia. 2. Ferro. 3. Água – Consumo. 4. Água – Análise.
I. Oliveira, Iara Brandão de. II. Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. III.
Título.

CDD – 551.49

CDU – 628.193.546.72

Dedico aos meus pais, **Nelson Alves Fiúza do Carmo** e **Crispiniana Cruz do Carmo** pelos exemplos de princípios morais e éticos deixados como legado para os seus descendentes; motivo de enorme orgulho.

Geólogo, formado pela Universidade Federal da Bahia, UFBA (1989)

“Lembre-se de colocar Deus em primeiro lugar, em todos os seus caminhos, e ele guiará os seus passos, e você andará no caminho certo. Não fique cheio de si, pensando que a sua própria sabedoria é a razão do seu sucesso. A verdadeira sabedoria é temer o Senhor e evitar o mal”.

Provérbios 3:6-7

JOSÉ CARLOS CRUZ DO CARMO

FERRO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO ESTADO DA BAHIA: Uma avaliação

vi

JOSÉ CARLOS CRUZ DO CARMO

FERRO NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO ESTADO DA BAHIA: Uma avaliação preliminar dos fatores influentes na concentração

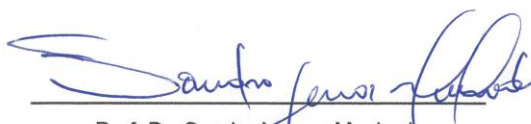
BANCA EXAMINADORA:



Profa. Dra. Iara Brandão de Oliveira

Orientador

MEAU - UFBA



Prof. Dr. Sandro Lemos Machado

MEAU - UFBA



Prof. Dr. Luís Rogério Bastos Leal

IGEO - UFBA



Prof. Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento

IGEO - UFBA

AGRADECIMENTOS

Ao nosso Deus e Pai, fonte de todo o conhecimento, sabedoria e inspiração, por ter me proporcionado viver essa magnífica experiência. Sem ELE, nada disso seria possível.

Aos meus queridos pais, minha irmã e meus irmãos, pelo incondicional apoio, fundamental para o enfrentamento desse desafio.

Às minhas filhas Tágira Neves do Carmo e Thaline Neves do Carmo, pelo carinho, compreensão, paciência e valiosas contribuições na construção desta Dissertação.

A Iara Brandão de Oliveira, orientadora amiga, pela confiança, incentivo, compreensão, paciência, sabedoria, valiosos ensinamentos e, sobretudo, exigência.

Ao Programa de Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana – MEAU, da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA), pela amistosa acolhida após vinte cinco anos afastado das salas de aula da UFBA.

A Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia – CERB, origem de meus conhecimentos práticos da hidrogeologia, pela participação e total apoio na realização deste trabalho.

Aos Profs. Sandro Lemos Machado, Luiz Rogério Bastos Leal e Sérgio Augusto de Moraes Nascimento, pelas contribuições e brilhantes ideias durante as qualificações desta pesquisa.

Ao Prof. Daniel Veras Ribeiro, Coordenador do MEAU, pelo incentivo, apoio e generosa acolhida.

Aos Profs. Ricardo Fernandes Carvalho, Miriam de Fátima Carvalho, Rita Dione, Ilce Marília Dantas Pinto de Freitas, Yvonilde Dantas Pinto Medeiros, Andrea Sousa Fontes, Fernando Rajendra Genz e Jardel Pereira Gonçalves, pela acolhida em sala de aula, paciência, compreensão e valiosos ensinamentos.

À Laís Carlos Boaventura Santos, professora de inglês, colega e amiga, pela paciência e pelos valiosos ensinamentos da língua estrangeira, que me proporcionaram excelente resultado na avaliação final.

À Nádia Tavares e Daniele Mota, funcionárias exemplares da secretaria do MEAU, pela paciência e inestimáveis contribuições, em todas as vezes que solicitadas.

Aos colegas da turma de Mestrado, Ana Claudia, Átila Caldas, Camila, Cantalino, Caroline, Daiane, Daniel, Elisângela, Fernanda, Gabriel, Helen, Isabela Muller, João Miguel, Marcella Sgura, Márcia Dourado, Rita de Cássia, Rosialine, Sandra Souza, Santiago, Simara Lobo, Silas, Thamires, Tiago, Vanessa, Victor, Viviane, Uldérico e Zenite, pelos conselhos, sugestões, discussões, orientações, companheirismo e convívio enriquecedor.

Aos amigos e colegas da CERB: Alda Moraes, Ana Cantolino, Ana Mascarenhas, Ângela Fonsêca, Aramis, Boanerges, Castro, Cleômenes, Cristovaldo, Erisvaldo, Eudes, Francisco Negrão, Godofredo, Guilherme, Humberto Mascarenhas, Jaime Matos, Jaime Neves, João Batista, Manoel Neto, Maria Rita, Nailson Pereira, Nelson, Pablo; além dos amigos, Eduardo Fontoura (CETREL), Arnaldo Ribeiro (HIDROCON), Sandro Ramos (INEMA), Danilo Lima (MAGNESITA BRUMADO), Roberto Domingues (PERCON), Pedro Avelino (TRANSPHEL), Moisés (UFBA), Thamires (UFBA), Geovani (UFBA) e Geysa (UFBA), pelo incentivo e confiança.

Às pessoas não citadas por lapso de memória e que, direta ou indiretamente contribuíram de alguma maneira para a concretização desse sonho; os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho avaliou a distribuição dos teores de ferro total na água subterrânea do Estado da Bahia para estabelecer uma relação com os fatores naturais: litologia, clima, solo, vegetação e com os parâmetros físico-químicos da água: cor aparente, turbidez, pH, condutividade elétrica, dureza total, sólidos totais dissolvidos, cloreto, alcalinidade total, cálcio, fluoreto, magnésio, nitrito, nitrato, sílica e sulfato. Para alcançar esse objetivo foram utilizadas análises de água de 3.539 poços tubulares profundos construídos pela CERB no período 2003 a 2013 das quais, 940 análises, ou 26,56% do universo pesquisado, apresentam teores elevados de ferro total na água subterrânea, distribuídos em todos os domínios hidrogeológicos do território baiano. Os teores de ferro foram espacializados nos quatro domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia, resultando em mapas das áreas críticas para a exploração da água subterrânea destinada ao abastecimento público. O tratamento estatístico através das Matrizes de Correlação Linear de Pearson e de Spearman revelaram somente significativa correlação entre o íon ferro e as propriedades cor aparente e turbidez, o que não se configura como um fato relevante do ponto de vista físico-químico. Para os demais parâmetros físico-químicos, nenhuma correlação foi identificada. As análises multivariadas SPSS e PCA apontaram, dentre os fatores naturais investigados, o clima e a litologia, como os de maior influência nas concentrações de ferro das águas subterrâneas no Estado da Bahia. O mapeamento das áreas com ferro alto ($>0,3$ mg/L) e o conhecimento embora preliminarmente dos fatores de maior influência na concentração de ferro nas águas subterrâneas assumem relevância nos estudos hidrogeológicos e na prospecção da água subterrânea, buscando evitarem-se os sítios com elevadas concentrações de ferro e água imprópria para o consumo humano.

Palavras-chave: Água subterrânea; ferro; consumo humano; Estado da Bahia.

ABSTRACT

This study evaluated the areal distribution of the groundwater total iron content in the State of Bahia to establish a relationship with the natural factors: lithology, climate, soil, vegetation. Also, evaluated the iron content with the physical and chemical parameters of water: color, turbidity, pH, electric conductivity, total hardness, total dissolved solids, chloride, total alkalinity, calcium, fluoride, magnesium, nitrite, nitrate, sulfate and silica. To achieve this goal this work used water analysis of 3,539 deep wells constructed by CERB in the period 2003-2013, from which 940 analysis, or 26.56% of the wells, presented high levels of total iron in groundwater, distributed in all hydrogeological areas of the State of Bahia. The total iron content spatialized in the four hydrogeological domains of the state of Bahia, resulted in maps with critical areas for exploitation of groundwater for public supply. Statistical analysis using the methods of linear correlation matrices of Pearson and Spearman revealed only significant correlation between the total iron content and the parameters color and turbidity, which does not qualify as a relevant fact from the physical-chemical point of view. The total iron content in groundwater revealed no correlation with the others physicochemical parameters. Among the natural factors investigated, the multivariate analysis SPSS and PCA indicated that climate and lithology have the greatest influence on iron concentrations in groundwater of the state of Bahia. The identification in the state of Bahia of areas with total iron content greater than 0.3 mg.L^{-1} , and the knowledge of the most influent factors in the iron concentration in groundwater, though preliminarily, assume relevance for the exploitation of groundwater, in order to avoid sites with high iron concentrations and unfit water for human consumption.

Keywords: Groundwater; iron; human consumption; Bahia state.

SUMÁRIO

	Pag.
BANCA EXAMINADORA	vi
AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
SUMÁRIO	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xvi
ÍNDICE DE QUADROS	xvii
ÍNDICE DE FIGURAS	xviii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xxii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Organização do trabalho	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Um pouco da História sobre a exploração da água subterrânea	4
2.2 Conceitos relativos à água subterrânea	7
2.2.1 Águas subterrâneas	7
2.2.2 Aquífero	7
2.2.3 Poço tubular	8
2.2.4 Qualidade da água	8
2.2.4.1 <u>Alcalinidade total</u>	9

2.2.4.2	<u>Condutividade elétrica (CE)</u>	10
2.2.4.3	<u>Cor aparente</u>	10
2.2.4.4	<u>Dureza total</u>	11
2.2.4.5	<u>Potencial hidrogeniônico (pH)</u>	12
2.2.4.6	<u>Sólidos totais dissolvidos (STD)</u>	12
2.2.4.7	<u>Turbidez</u>	13
2.3	Formas de ocorrência do ferro em águas superficiais e subterrâneas	13
2.4	Impactos do ferro e consequências à saúde humana	15
2.5	Métodos utilizados na remoção de ferro da água	17
2.6	Unidades litológicas portadoras de ferro no Estado da Bahia	18
2.6.1	<i>Corpos máfico-ultramáficos</i>	18
2.6.2	<i>Greenstone belts</i>	20
2.6.3	<i>Sequências metavulcanossedimentares</i>	22
2.6.4	<i>Região da Serra de Jacobina</i>	23
2.6.5	<i>Granulitos heterogêneos orto e paraderivados</i>	23
2.7	Fatores influentes na qualidade química das águas subterrâneas	23
2.7.1	<i>Clima</i>	23
2.7.2	<i>Vegetação</i>	25
2.7.3	<i>Litologia</i>	26
2.7.4	<i>Regolito</i>	27
2.7.5	<i>Faturamentos – profundidade de entradas de águas</i>	28

3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	31
3.1	Climatologia	31
3.2	Solo	33
3.3	Cobertura vegetal	35
3.3.1	<i>Florestas costeiras da Bahia.....</i>	<i>36</i>
3.3.2	<i>Florestas do interior da Bahia</i>	<i>36</i>
3.3.3	<i>Florestas secas do Nordeste</i>	<i>36</i>
3.3.4	<i>Caatinga</i>	<i>37</i>
3.3.5	<i>Cerrado</i>	<i>37</i>
3.3.6	<i>Chapada Diamantina</i>	<i>37</i>
3.4	Domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia	39
3.4.1	<i>Domínio das rochas cristalinas</i>	<i>41</i>
3.4.2	<i>Domínio das rochas metassedimentares</i>	<i>41</i>
3.4.3	<i>Domínio das rocha calcárias</i>	<i>42</i>
3.4.4	<i>Domínio das rochas sedimentares.....</i>	<i>42</i>
3.5	Resumo dos fatores naturais por domínio hidrogeológico ..	43
4	MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1	Cadastro de poços tubulares	45
4.2	Análises físico-químicas	48
4.3	Confecção de mapas	51
4.4	Campanhas de campo	52
4.5	Tratamento estatístico dos dados	57
4.5.1	<i>Estatística descritiva</i>	<i>57</i>
4.5.2	<i>Análise de correlação bivariada</i>	<i>57</i>

4.5.3	<i>Análise de correlação multivariada – SPSS e PCA</i>	59
4.6	Escolha das notas para valoração dos atributos	60
4.6.1	<i>Litologia</i>	61
4.6.2	<i>Clima</i>	62
4.6.3	<i>Vegetação</i>	62
4.6.4	<i>Solo</i>	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1	Distribuição dos teores de ferro da água subterrânea do Estado da Bahia	64
5.1.1	<i>Domínio das rochas cristalinas</i>	69
5.1.2	<i>Domínio das rochas metassedimentares</i>	80
5.1.3	<i>Domínio das rochas sedimentares</i>	84
5.1.4	<i>Domínio das rochas calcárias</i>	93
5.2	Definição das notas: importância dos fatores naturais sobre o teor de ferro na água subterrânea	99
5.2.1	<i>Litologia</i>	99
5.2.2	<i>Clima</i>	100
5.2.3	<i>Vegetação</i>	102
5.2.4	<i>Solo</i>	103
5.2.5	<i>Síntese dos valores atribuídos</i>	104
5.3	Tratamento estatístico dos dados	104
5.3.1	<i>Estatística descritiva</i>	104
5.3.2	<i>Análise bivariada</i>	107
5.3.3	<i>Análise multivariada</i>	109

6	CONCLUSÕES	113
7	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	115
	REFERÊNCIAS	116

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1. Solubilidade de ferro em função do pH	15
Tabela 2. Participação em percentual dos tipos de solos no Estado da Bahia	33
Tabela 3. Modelo de Laudo do Laboratório do Departamento de Engenharia Ambiental – LABDEA e do Laboratório de Química do SENAI-CETIND	50
Tabela 4. Poços perfurados pela CERB de 2003 a 2013, por domínio hidrogeológico e por teor de ferro	64
Tabela 5. Relação entre as condições climáticas e a distribuição de poços com $Fe > 0,3$ mg/L no compartimento Cristalino Centro-Norte	73
Tabela 6. Distribuição das unidades litológicas por faixas climáticas, no compartimento Cristalino Centro-Norte	73
Tabela 7. Municípios com maiores densidades de poços com $Fe > 0,3$ mg/L por unidade litológica no compartimento Cristalino Sudoeste	78
Tabela 8. Percentual de ocorrência das entradas de água por profundidade	79
Tabela 9. Percentual de ocorrência das entradas de água por profundidade	83
Tabela 10. Percentual de ocorrência das entradas de água por faixa de profundidade	98
Tabela 11. Distribuição dos teores de ferro (0,00 a 3,45 mg/L) por intervalo de classes	105
Tabela 12. Distribuição dos teores de ferro $\geq 0,31$ mg/L por intervalo de classes	105
Tabela 13. Coeficientes obtidos da análise SPS	110
Tabela 14. Pesos das variáveis originais e as variâncias para cada um dos componentes para os dois primeiros PCs	111

ÌNDICE DE QUADROS

	Pág.
Quadro 1. Padrão de referência para o consumo humano (VMP)	13
Quadro 2. Métodos de remoção de ferro da água por faixa de teores	18
Quadro 3. Reservas e potencialidades das águas subterrâneas da Bahia .	41
Quadro 4. Características dos fatores naturais por domínio hidrogeológico expandido do Estado da Bahia	44
Quadro 5. Poços tubulares perfurados na Bacia do Tucano com alta concentração de ferro	87
Quadro 6. Notas dadas aos fatores influentes na concentração de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia	104
Quadro 7. Matriz de Correlação Linear de Pearson para o universo de 940 amostras de água subterrânea com altos teores de ferro	108
Quadro 8. Matriz de Correlação Linear de Spearman para o universo de 940 amostras de água subterrânea com altos teores de ferro	109

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Perfuratriz Percussora	6
Figura 2. a) Conjunto Roto-Pneumático, 2005. Figura; b). Rotativa, 2014 ...	6
Figura 3. Diagrama Eh-pH do ferro	14
Figura 4. Esquema da disposição do manto de intemperismo em diferentes climas	24
Figura 5. Relação de fraturamentos com a vegetação	26
Figura 6. a) Interação entre a litosfera, atmosfera, hidrosfera e a biosfera; b) Perfil esquemático da evolução rocha-regolito	27
Figura 7. Representação esquemática da alteração: a) da rocha em solo e b) de minerais primários em minerais secundários	28
Figuras 8. a) Fraturas extensionais; b) Fraturas compressoriais; c) Fraturas de cisalhamento	29
Figura 9. Mapa dos Tipos de Climas do Estado da Bahia, modificado de Bahia, 2003	32
Figura 10. Mapa de Solos do Estado da Bahia, modificado de Bahia, 2003	34
Figura 11. Mapa das ecoregiões do Estado da Bahia, modificado de Bahia, 2003	35
Figura 12. Tipos de algumas vegetações que ocorrem na Bahia. a) Floresta Ombrófila Densa; b) Floresta Estacional Semidecidual; c) Caatinga, período chuvoso; d) Caatinga, período seco; e) Cerrado; f) Chapada Diamantina	38
Figura 13. Mapa dos domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia	40
Figura 14. Ficha do poço de Conceição do Coité – Lagoa da Vaca	46
Figura 15. Sistemas de abastecimento de água instalados com equipamentos para remoção de ferro da água em: Santo Antônio (a – b); Assentamento Coari Terra (c – d) e Chapadinha (e – f)	54

Figura 16. Sequência de fotos do local do poço de Lagoa da Vaca – Conceição do Coité. a) Poço instalado para dessedentação animal; b) O geólogo Humberto revisitando o local; c e d) Corte da encosta com exposição da rocha matriz, manto de alteração e solo; afloramentos de greenstone belt com lineamentos e fraturamentos	56
Figura 17. Gráficos de dispersões: a) correlação linear positiva perfeita entre as variáveis X e Y; b) correlação linear nula entre as variáveis X e Y; c) correlação linear negativa perfeita entre as variáveis X e Y; d) correlação não linear entre as variáveis X e Y	58
Figura 18. Distribuição de ferro no universo de 940 amostras com teor >0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, por domínio hidrogeológico	65
Figura 19. Mapa de localização dos 3.539 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão ≥ 1 m ³ /h, por município do Estado da Bahia	67
Figura 20. Mapa de contorno de teores de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia	68
Figura 21. Mapa de localização dos 1.688 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, no domínio hidrogeológico das rochas cristalinas	70
Figura 22. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, por tipo de clima, no compartimento Cristalino Centro-Norte	71
Figura 23. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão ≥ 1 m ³ /h, por tipo de clima, no compartimento Cristalino Centro-Sul	75
Figura 24. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão ≥ 1 m ³ /h, por tipo de clima, no compartimento Cristalino Sudoeste	77
Figura 25. Mapa de localização dos 697 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, no domínio hidrogeológico das rochas metassedimentares	81

Figura 26. Mapa de localização dos 494 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, no domínio hidrogeológico das rochas sedimentares	85
Figura 27. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, no compartimento Bacia do Tucano	86
Figura 28. Mapa de localização dos poços com poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, no compartimento Bacia do Recôncavo-Camamu	88
Figura 29. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, no compartimento Sedimentos Litorâneos ...	90
Figura 30. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, no compartimento Urucuia	92
Figura 31. Mapa de localização dos 660 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, no domínio hidrogeológico das rochas calcárias	94
Figura 32. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, no compartimento dos Calcários da Chapada Diamantina	95
Figura 33. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m ³ /h, no compartimento dos Calcários do Oeste	97
Figura 34. Diagrama de dispersão dos altos teores de ferro por domínio hidrogeológico do Estado da Bahia	99
Figura 35. Diagrama de dispersão dos altos teores de ferro por tipo de clima do Estado da Bahia	100
Figura 36. Diagrama de dispersão dos altos teores de ferro por ecoregiões do Estado da Bahia	102
Figura 37. Diagrama de dispersão dos altos teores de ferro por tipo de solo do Estado da Bahia	103

Figura 38. a) Distribuição dos teores de ferro por intervalo de classes, no universo de 3.392 amostras, com ferro abaixo e acima de 0,30 mg/L; b) distribuição dos teores de ferro por intervalo de classes, no universo de 940 amostras com ferro acima de 0,30 mg/L	106
Figura 39. Sequência de gráficos de dispersão mostrando a relação do ferro com 15 parâmetros físico-químicos da água subterrânea	107
Figura 40. Gráfico de pesos da análise de componentes principais (PC1 X PC2)	112

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABAS	Associação Brasileira de Águas Subterrâneas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AU	Ouro
Ca	Cálcio
CERB	Companhia de Engenharia Ambiental da Bahia
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
Cr	Cromo
Cu	Cobre
E.A.	Entrada de Água
EGP	Elemento do Grupo da Platina
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
Fe	Ferro
H ⁺	Hidrogênio
IGEO	Instituto de Geociências
Km	Quilometro
LABDEA	Laboratório do Departamento de Engenharia Ambiental
Mg	Magnésio
Mg/L	Miligrama por litro
MS	Ministério da Saúde
Mm	Milímetro
N	Norte

NE	Nordeste
NBR	Norma Brasileira
Ni	Níquel
NNE	Norte-Nordeste
NW	Noroeste
Pb	Chumbo
PCA	Análise de Componente Principal
PERHBA	Plano Estadual de Recursos Hídricos da Bahia
pH	Potencial Hidrogeniônico
RT	Resíduo Total
S	Sul
SE	Sudeste
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SPSS	Programa Estatístico para Ciências Sociais
SW	Sudoeste
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
Ti	Titânio
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UT	Unidade de Turbidez
V	Vanádio
Zn	Zinco

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde, toda a água destinada ao consumo humano deve obedecer ao padrão de potabilidade. Os parâmetros físicos, químicos, microbiológicos e radioativos são determinados pela mesma Portaria (Brasil, 2011).

No Brasil utiliza-se largamente a água subterrânea no abastecimento de centros urbanos e comunidades rurais, na agricultura irrigada e indústria, na dessedentação animal, como água mineral ou potável de mesa, além de atividades aplicadas ao turismo. No Estado da Bahia existem diversas localidades que são supridas com água subterrânea proveniente de poços tubulares profundos, como única forma de abastecimento.

Dentre as várias vantagens da utilização das águas subterrâneas, pode-se ressaltar o baixo custo de captação se comparado com o das águas superficiais, por exigir menos construções, maior facilidade de exploração e menor impacto ambiental, desde que os poços sejam feitos seguindo as normas técnicas e atendendo os critérios de outorga do órgão ambiental (Stephen, 1988).

Apesar de maior proteção aos contaminantes externos, as águas subterrâneas podem apresentar problemas de qualidade, interferindo em seu uso para diversos fins. Dentre esses, um dos mais frequentes consiste na presença de ferro dissolvido em teores elevados, limitando, algumas vezes, a sua utilização (Oliveira et al. 2004).

Com base no Banco de Dados da Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia - CERB, 26,56% dos poços perfurados no período de 2003 a 2013, com vazões aproveitáveis, apresentaram teores elevados de ferro total. Assim, vários poços deixaram de ser instalados para o abastecimento público, trazendo como consequências prejuízos financeiros para o Estado e para as comunidades, a frustração ao ver o poço perfurado com água doce e, em seguida, a impossibilidade de aproveitamento da água para o consumo humano, devido ao custo do tratamento da água.

Os íons de ferro na água causam depósitos, incrustações e possibilitam o desenvolvimento de colônias de bactérias ferruginosas nocivas nas redes de abastecimento, resultando em gosto e odor na água, manchas em roupas e aparelhos sanitários, interferência em processos industriais (Richter & Azevedo Netto, 1991; Porpino, 2009; Custódio & Llamas, 1983; Macêdo, 2001; Madeira, 2003), além de apresentar consequências à saúde (Siqueira et al. 2011; Feitosa et al. 1997; Welz & Sperling, 1999; Devlin, 1998; Mahan, 2000).

Devido à grave problemática da presença de excesso de ferro na água subterrânea do Estado da Bahia, esse trabalho buscou sistematizar informações sobre os fatores naturais que influenciam a presença de ferro na água. O objetivo é auxiliar nos estudos hidrogeológicos e no planejamento para melhorar o aproveitamento dos poços perfurados nas áreas potencialmente comprometidas com ferro, pela inserção de novas práticas nos critérios de locação.

1.1 Objetivo geral

Identificar os fatores mais influentes na concentração de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia, permitindo melhorar os critérios de locação e perfuração de poços tubulares, evitando-se as áreas com elevados teores de ferro e água imprópria para o consumo humano.

1.2 Objetivos específicos

Avaliar a distribuição dos teores de ferro nos domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia.

Avaliar a relação dos teores de ferro com os parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas: cor aparente, turbidez, pH, condutividade elétrica, dureza total, sólidos totais dissolvidos, cloreto, alcalinidade total, cálcio, fluoreto, magnésio, nitrito, nitrato, sílica e sulfato.

Avaliar a influência dos fatores naturais: clima, litologia, solo, vegetação e profundidade de fraturamentos na concentração de ferro nas águas subterrâneas.

Avaliar, quais fatores são mais determinantes para a concentração de ferro na água subterrânea.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho apresenta a seguinte estrutura: no capítulo 1 constam o problema, a justificativa do estudo e os objetivos que se pretendem alcançar.

No capítulo 2 é desenvolvida a revisão de literatura sobre os temas correlacionados a essa pesquisa: um pouco da História sobre a exploração da água subterrânea, conceitos relativos à água subterrânea, formas de ocorrência do ferro em águas superficiais e subterrâneas, impactos do ferro e consequências à saúde humana, processos de remoção do ferro da água, unidades litológicas portadoras de ferro no Estado da Bahia e fatores influentes na qualidade química das águas subterrâneas.

No capítulo 3 é apresentada a caracterização da área de estudo. Estão contidas de forma bastante resumida às informações de climas, solos, coberturas vegetais e domínios hidrogeológicos, do Estado da Bahia.

O capítulo 4 é caracterizado por apresentar a metodologia utilizada para alcançar os objetivos propostos. Consiste no levantamento dos dados construtivos dos poços e análises físico-químicas das águas, campanhas de campo, tratamento estatístico e a produção das representações gráficas e mapas de teores de ferro.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos e as discussões e no capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Inúmeros trabalhos foram desenvolvidos sobre a ocorrência de ferro nas águas subterrâneas, sendo que, a grande maioria enfatiza as técnicas e processos aplicados para a remoção do excesso deste elemento. Faltam, na literatura, pesquisas que relacionam a presença de ferro a fatores influentes em sua concentração nas águas subterrâneas e como este se distribui nos aquíferos. Neste capítulo é apresentado um pouco da História sobre a exploração da água subterrânea, conceitos relativos à água subterrânea, formas de ocorrência do ferro em águas superficiais e subterrâneas, impactos do ferro e consequências à saúde humana, processos de tratamento para a remoção de ferro, unidades litológicas portadoras de ferro no Estado da Bahia e fatores influentes na qualidade química das águas subterrâneas.

2.1 Um pouco da história sobre a exploração da água subterrânea

Desde as primeiras civilizações, a água subterrânea exerceu importante papel para a sobrevivência da humanidade, que para atender as suas necessidades, lançava mão a escavar poços. A Bíblia Sagrada faz citações sobre o uso e importância desses poços. Uma muito conhecida é de um poço escavado em calcário há cerca de 3.500 anos, numa propriedade comprada por Jacó e dada a seu filho José, junto do qual Jesus pediu a mulher de Samaria que lhe desse de beber, e com ela manteve longa conversação (Machado, 2005).

De acordo com MACHADO (2005), os chineses foram os que mais se utilizaram da perfuração de poços, sendo invenção deles o método de perfuração a percussão. O uso principal para esses poços profundos era a obtenção de grandes quantidades de salmouras, que evaporadas, supriam a China de sal de cozinha.

No ocidente, entretanto, DINIZ (2004) encontrou que o interesse na perfuração de poços substituindo a escavação, foi despertado no século XII, quando se perfurou com sucesso um poço em Artois, na França, em 1126. Já em 1808, foi perfurado o primeiro poço nos Estados Unidos pelo método à

percussão, em Buffalo Lick, Virginia. Em Grenelle, próximo a Paris, um poço iniciado em 1833 e concluído em 1841, por muitos anos foi considerado o poço mais profundo do mundo, com 549 m. O êxito alcançado na França prosseguiu com as perfurações profundas na Inglaterra e na Alemanha.

Chegando ao século XX, DINIZ (2004) relata que, em 1941, durante a Segunda Guerra Mundial, surgiram as máquinas rotativas, utilizadas na perfuração de poços profundos para o abastecimento de água potável das tropas em litígio. No Brasil, até meados da década de 80, boa parte dos equipamentos para a perfuração de poços era importada dos Estados Unidos, da Suécia e da Alemanha. Posteriormente começaram a serem desenvolvidos os equipamentos no Brasil, pelas empresas nacionais.

De forma paralela, o crescimento da indústria petrolífera nacional, através da Petrobrás, fortaleceu as empresas de equipamentos para perfuração e hoje, o mercado nacional atende, com sucesso, as empresas de poços para a captação de água subterrânea. Os poços passaram a ter um padrão de qualidade na sua execução e os tempos de construção foram reduzidos substancialmente (Diniz, 2004).

Na Bahia, a primeira empresa estatal de perfuração de poços foi a Empresa de Conservação do Solo, Água e Mecanização Agrícola – ECOSAMA, fundada na década de 60 e vinculada à Secretaria de Agricultura. Com a criação da Secretária de Saneamento Básico e Recursos Hídricos em 1971, a ECOSAMA foi extinta e criada no ano seguinte a Companhia de Engenharia Rural da Bahia – CERB, como empresa executora dessa Secretaria. A CERB absorveu do parque operacional da antiga empresa dez perfuratrizes percussoras, com as quais foram perfurados os primeiros poços tubulares (Figura 1).



Figura 1. Perfuratriz Percussora. Fonte: O Autor.

Ainda em 1972 foram adquiridas pela Companhia as primeiras perfuratrizes roto-pneumáticas, denominadas de PR-01 e PR-02, para dar maior celeridade aos trabalhos de perfuração. A empresa se fortaleceu ao longo dessas quatro décadas, renovando e ampliando o seu quadro técnico-operacional, vindo a se tornar no Brasil referência em prospecção de água subterrânea. As Figuras 2(a e b) mostram o parque de máquinas da CERB em 2005 e 2014.

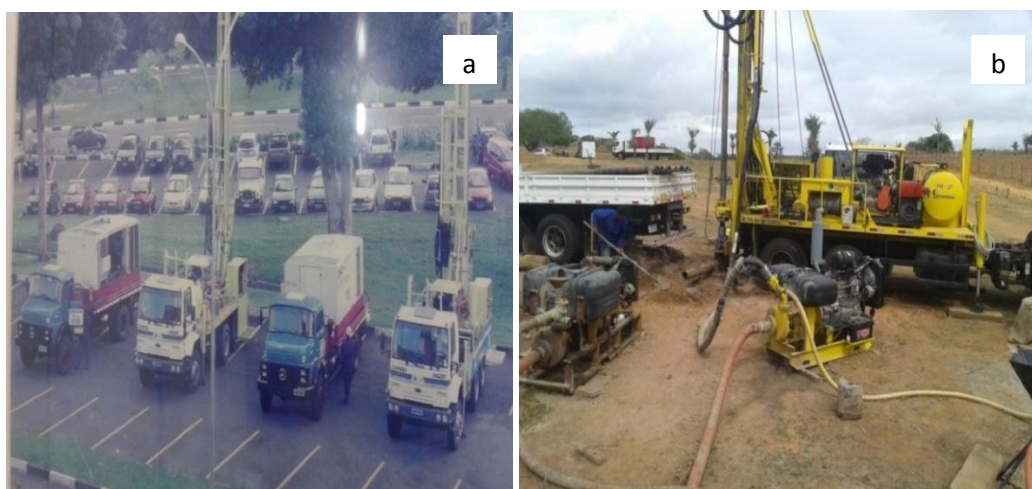


Figura 2(a). Conjunto Roto-Pneumático, 2005. Figura 2(b). Rotativa, 2014. Fonte: O Autor.

7.1 Conceitos relativos à água subterrânea

A seguir são apresentadas de forma bastante resumida, definições dos principais assuntos que apresentam relação com o tema da pesquisa.

2.2.1 *Água subterrânea*

De acordo com BORGHETTI et al. (2004) água subterrânea é toda a água existente abaixo da superfície do terreno, que circula nos espaços vazios (poros e fraturas) das rochas, sendo resultado da infiltração das águas de precipitação. Esta infiltração tem movimento descendente, impulsionada pela gravidade, fazendo com que ela siga seu caminho, até atingir o nível freático.

A água subterrânea faz parte do gigantesco ciclo hidrológico da terra. Por ocorrer em subsuperfície, encontra-se menos vulnerável às contaminações do que a água superficial. Essa condição de proteção lhe confere importante papel no abastecimento humano e a coloca como reserva estratégica para as mais diversas finalidades de uso.

7.1.1 *Aquífero*

Aquífero é o reservatório subterrâneo constituído por camadas geológicas com suficiente permeabilidade e porosidade interconectada, para armazenar e transmitir volume significativo de água, que possa ser aproveitada para usos diversos, cuja exploração seja economicamente viável (Borghetti et al. 2004).

O aquífero se divide quanto à porosidade em sedimentar ou poroso (porosidade primária), cárstico e fissural ou fraturado (porosidades secundárias).

Um aquífero pode ter extensão de poucos quilômetros quadrados a milhares de quilômetros quadrados, ou pode, também, apresentar espessuras de poucos metros a centenas de metros (Rebouças et al. 2002).

2.2.3 Poço tubular

Obra de engenharia geológica, de formato cilíndrico, com diâmetros de perfuração de 4" (poço de pesquisa e monitoramento) e de 6" a 36", para captar água diretamente do aquífero. Todas as etapas que envolvem o poço tubular são regidas pelas normas técnicas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. As principais Normas Brasileiras que regulamentam o assunto são:

NBR 12212 – Projeto de poço tubular profundo para captação de água subterrânea.

NBR 12244 – Construção de poço tubular profundo para captação de água subterrânea.

NBR 13604/13605/13606/13607/13608 – Material de revestimento: tubos de PVC para poços tubulares profundos.

NBR 13895 – Poços de monitoramento e amostragem

2.2.4 Qualidade da água

O estudo hidrogeoquímico tem por finalidade identificar e quantificar as principais propriedades e os constituintes químicos presentes nas águas subterrâneas, procurando estabelecer uma relação com o meio físico rochoso. A água subterrânea tende a aumentar a concentração de substâncias dissolvidas à medida que percola os diferentes aquíferos, mas muitos outros fatores interferem, tais como: o clima, a composição da água da recarga, o tempo de contato/meio físico entre outros, além da contaminação antrópica (Fenzl, 1986).

Para NASCIMENTO (2008), as características hidroquímicas das águas subterrâneas no seu estado natural, sem a interferência de fatores antrópicos, estão diretamente subordinadas às condições geológicas, principalmente à litologia do aquífero, do fluxo subterrâneo, da recarga, da profundidade e do tempo de permanência da água no sistema aquífero, além do clima da região.

A avaliação de parâmetros físico-químicos fornece uma ideia da qualidade da água subterrânea de um determinado local (Feitosa et al., 1997).

De acordo com PIVELI & KATO (2005) os íons de interesse nos estudos de controle da qualidade de águas são:

Cátions

- Ferro: Fe^{+2} (íon ferroso), Fe^{+3} (íon férrico);
- Manganês: Mn^{+2} (íon manganoso), Mn^{+4} (íon mangânico);
- Metais alcalinos: Na^{+} (sódio), K^{+} (potássio);
- Metais alcalino terrosos: Ca^{+2} (cálcio), Mg^{+2} (magnésio);
- Metais Pesados: Cr^{+6} (cromo hexavalente), Cr^{+3} (cromo trivalente), Zn^{+2} (zinco), Pb^{+2} (chumbo), Cd^{+2} (cádmio), Hg^{+2} (íon mercúrio), Ba^{+2} (bário), Cu^{+2} (cobre), Ni^{+2} (níquel), Sn^{+2} (estanho), Al^{+3} (alumínio).

Ânions

- Monovalentes: HCO_3^{-} (bicarbonato), NO_2^{-} (nitrito), NO_3^{-} (nitrato), F^{-} (fluoreto), Cl^{-} (cloreto), OCl^{-} (hipoclorito), MnO_4^{-1} (permanganato);
- Bivalentes: CO_3^{-2} (carbonato), SO_4^{-2} (sulfato), S^{-2} (sulfeto), CrO_4^{-2} (cromato), $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$ (dicromato);
- Trivalente: PO_4^{-3} (fosfato).

2.2.4.1 Alcalinidade total

Alcalinidade total é a medida total das substâncias presentes na água, capazes de neutralizar ácidos, atuando como tampão. Os compostos responsáveis pela alcalinidade total são sais que contém carbonatos (CO_3^{-2}), bicarbonatos (HCO_3^{-}) e hidróxidos (OH^{-}). Os minerais com capacidade tampão mais comuns são calcita (CaCO_3), magnesita (MgCO_3), dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) e brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) (Zimbres, 2002; Embrapa, 2011).

De acordo com PIVELI & KATO (2005), a alcalinidade de uma amostra de água pode ser definida como sua capacidade de reagir quantitativamente com

um ácido forte até um valor definido de pH. Assim como o pH, as medidas de alcalinidade em águas de abastecimento e residuárias são utilizadas na interpretação e no controle de processos de tratamento.

A alcalinidade total em amostras de água é determinada por volumetria e expressa em mg L^{-1} (EMBAPA, 2011). Não há limite máximo (VMP) para alcalinidade na água para consumo humano na Portaria do Ministério da Saúde (MS) 2914/2011.

2.2.4.2 Condutividade elétrica (CE)

Condutividade elétrica é a capacidade que uma solução aquosa possui em conduzir corrente elétrica. Esta capacidade depende da presença de íons, concentração total, mobilidade, valência, concentrações relativas e medidas de temperatura. As aplicações práticas para a tomada da medida da condutividade são: indicação do grau de mineralização da água e indicação rápida de variações nas concentrações de minerais dissolvidos (Clesceri et al. 1998). Assim, quanto maior a concentração de íons numa água, maior será a sua condutividade elétrica.

Não existe um valor máximo estabelecido para o parâmetro da condutividade elétrica em uma água potável na Portaria MS 2914/2011. A condutividade é medida por condutímetro e é expressa em $\mu\text{S cm}^{-1}$ ou mS cm^{-1} (EMBAPA, 2011).

2.2.4.3 Cor aparente

A cor aparente de uma amostra de água está associada ao grau de redução de intensidade que a luz sofre ao atravessá-la. Esta redução dá-se por absorção de parte da radiação eletromagnética devido à presença de sólidos dissolvidos, principalmente material em estado coloidal orgânico e inorgânico. Os principais são os óxidos de ferro e manganês, que são abundantes em diversos tipos de solo (Cetesb, 2015).

A cor é um parâmetro fundamental no controle da qualidade das águas nas estações de tratamento, não só por tratar-se de padrão de potabilidade como também por ser parâmetro operacional de controle da qualidade da água bruta, da água decantada e da água filtrada, servindo como base para a determinação das dosagens de produtos químicos a serem adicionados, dos graus de mistura, dos tempos de contato e de sedimentação das partículas floculadas (Piveli & Kato, 2005).

Segundo ZIMBRES (2002), a medida da cor de uma água é feita pela comparação com soluções conhecidas de platina-cobalto ou com discos de vidro corados calibrados com a solução de platina-cobalto. Em geral as águas subterrâneas apresentam valores de cor aparente inferiores a 5mg de platina. O índice máximo permitido deve ser de 15 mg Pt L⁻¹, conforme estabelece a Portaria do MS nº 2914, de 12 de dezembro de 2011.

2.2.4.4 Dureza total

A dureza da água é a soma dos cátions bivalentes presentes na sua constituição e expressa em termos da quantidade equivalente de CaCO₃. Os principais íons metálicos que garantem dureza à água são os alcalino-terrosos, como cálcio e magnésio, que quase sempre estão associados a íons sulfato. Outros cátions como ferro, manganês, estrôncio, zinco e alumínio também podem conferir dureza à água. Em menor frequência, os cátions estão associados a nitritos e a cloretos (Di Bernardo & Dantas, 2005).

De um modo prático, outra definição dada por PIVELI & KATO (2005) é que a dureza é uma medida da sua capacidade de precipitar sabão. Nas águas que possuem os sabões se transformam em complexos insolúveis, não formando espuma até que o processo se esgote.

Segundo a Portaria 2914/11 do MS, o valor máximo permitido de dureza total na água para o consumo humano é de 500 mg L⁻¹. A dureza é obtida pelo método da titulometria (Embrapa, 2011).

2.2.4.5 Potencial hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico é uma escala logarítmica que mede o grau de acidez ($\text{pH} < 7$), neutralidade ($\text{pH} = 7$) ou alcalinidade ($\text{pH} > 7$) de uma solução aquosa. É uma das ferramentas mais importantes e frequentemente usadas em análise de água, exercendo influência direta nos ecossistemas aquáticos por seus efeitos sobre a fisiologia das diversas espécies; e indireta, por contribuir para a precipitação/dissolução de elementos químicos, como metais pesados (Piveli & Kato, 2005).

O pH é a medida da concentração de íons H^+ na água. O balanço dos íons hidrogênio e hidróxido (OH^-) determina quão ácida ou básica é a água. Na água quimicamente pura os íons H^+ estão em equilíbrio com os íons OH^- e o seu pH é neutro. Os principais fatores que interferem o pH da água subterrânea são o gás carbônico dissolvido e a alcalinidade (Zimbres, 2002).

De acordo com a Portaria 2914/11 do MS, as águas para abastecimento devem apresentar valores de pH entre 6,0 e 9,5. O método mais utilizado na determinação do pH é o potenciométrico (EMBAPA, 2011).

2.2.4.6 Sólidos totais dissolvidos (STD)

São consideradas como sólidos numa água, todas as partículas presentes em suspensão ou em solução, sedimentáveis ou não, orgânicas ou minerais (Feitosa, 2000). A determinação da quantidade total destas partículas presentes em uma amostra de água é chamada de sólidos totais dissolvidos.

De acordo com os valores de STD, as águas subterrâneas podem ser classificadas em doces, salobras ou salgadas. As águas doces apresentam valores de STD de 0 a 500 mg/L, as águas salobras contêm de 500 a 1500 mg/L e as salgadas apresentam valores acima de 1500 mg/L (Ceará, 2015).

Como padrão de aceitação para o consumo humano, a portaria nº 2914/11 estabelece o valor máximo permitido de 1.000 mg L⁻¹ de STD na água.

2.2.4.7 Turbidez

A turbidez corresponde ao grau de redução que a luz sofre ao atravessar uma quantidade de água, devido à presença de partículas e substâncias em suspensão que esta contém. É causada por matérias sólidas em suspensão (silte, argila, coloides, matéria orgânica, etc.). Em alguns casos, águas ricas em íons Fe podem apresentar uma elevação de sua turbidez quando entram em contato com o oxigênio do ar. A cor da água também interfere negativamente na medida de turbidez devido à sua propriedade de absorver luz (Pavanelli, 2001).

A turbidez também é entendida como um parâmetro que indica a qualidade estética das águas para abastecimento público (Clesceri et al., 1998). Os valores são expressos em Unidade de Turbidez (UT). O valor máximo permitido na água para o consumo humano é de 5 UT, segundo a Portaria 2914/11 do MS.

O Quadro 1 apresenta os valores máximos permitidos para as propriedades químicas apresentadas acima, com base na Portaria MS 2914/2011.

Quadro 1. Padrão de referência para consumo humano (VMP)

PARÂMETRO	LIMITE
Alcalinidade total	-
Condutividade elétrica	-
Cor aparente	15 uH
Dureza	500 mg L ⁻¹
Ferro	0,3 mg L ⁻¹
pH	6,0 - 9,5
Sólidos dissolvidos totais	1.000 mg L ⁻¹
Turbidez	5 UT

Fonte: Brasil, 2011.

2.3 **Formas de ocorrência do ferro em águas superficiais e subterrâneas**

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, apenas em menor quantidade que o oxigênio, silício e alumínio, sendo que os minerais

mais importantes que contêm esse elemento são: magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3), limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2$), siderita (FeCO_3), ilmenita (FeTiO_3) e pirita (FeS_2). (Lee, 1999; Feitosa et al. 1997).

Nas águas naturais, o ferro é encontrado principalmente sob as formas de bicarbonato ferroso ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$), hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) e sulfato ferroso (FeSO_4). O ferro solúvel está associado a bicarbonatos e cloretos (Di Bernardo, 1992).

Teores elevados de ferro são encontrados com maior frequência nas águas superficiais, com o ferro ligado ou combinado com a matéria orgânica e, frequentemente, em estado coloidal ou húmus. Quanto à ocorrência nas águas subterrâneas, está associado às águas de pH baixo, ricas em gás carbônico e sem oxigênio dissolvido, sob a forma de bicarbonatos ferrosos dissolvidos. Ele pode estar na forma de Fe^{3+} , Fe^{2+} e FeOH^{2+} . O Fe^{3+} somente está presente em solução nas águas muito ácidas com pH menor que 3, que são raras (Richter & Azevedo Netto, 1991; Feitosa et al. 1997; Szikszay, 1993).

Segundo SZIKSZAY (1993), a solubilização do ferro é ligada a alteração de minerais ferro-magnesianos e férricos (Figura 3).

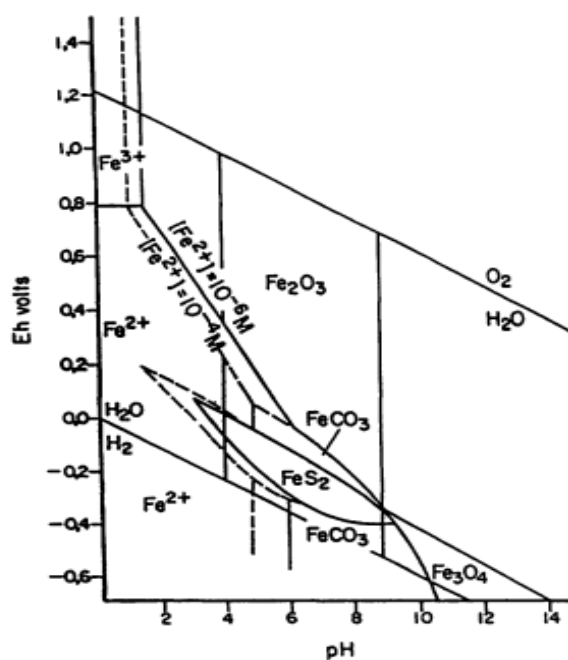


Figura 3. Diagrama Eh-pH do ferro. Fonte: Krauskopf, 1972.

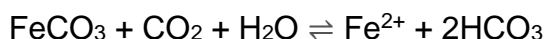
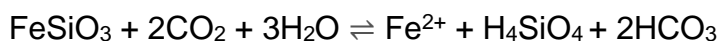
A solubilidade do ferro em função do pH é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Solubilidade do ferro em função do pH

pH	Solubilidade em mg/m ³
8,5	3.10 ⁻⁸
8	4.10 ⁻⁷
7	4.10 ⁻⁵
6	5.10 ⁻³

Fonte: Schoeller, 1962.

A solubilização do ferro é complexa porque envolve reações de oxirredução. O ferro ferroso é inicialmente liberado do mineral com ataque do ácido carbônico e depois é oxidado pelo oxigênio dissolvido (Szikszay, 1993), conforme demonstrado nas equações abaixo:



depois é oxidado



2.4 Impactos do ferro e consequências à saúde humana

O ferro no estado ferroso (Fe⁺²) forma compostos solúveis, principalmente hidróxidos. Em ambientes oxidantes o Fe⁺² passa a Fe⁺³ dando origem ao hidróxido férrico, que é insolúvel e se precipita, tingindo fortemente a água. Desta forma, águas com alto conteúdo de Fe, ao saírem do poço são incolores, mas após algum tempo de exposição ao ar (de 10 minutos a algumas horas, sendo este período tanto mais curto quanto mais elevado o pH), elas se tornam a princípio leitosas e em seguida amareladas em virtude de reações de oxidação (Di Bernardo, 1992; Zimbres, 2002).

O ferro é encontrado em praticamente todas as águas, porém, quando encontrado em teores superiores a 0,5 mg/L, a água tem sua cor, turbidez, odor e sabor alterados. Os íons de ferro em águas destinadas ao abastecimento causam depósitos, incrustações e possibilitam o desenvolvimento de colônias de

bactérias ferruginosas nocivas nas redes de abastecimento, são responsáveis pelo aparecimento de manchas em roupas e aparelhos sanitários, além de interferir em processos industriais (Richter & Azevedo Netto, 1991; Porpino, 2009; Custódio & Llamas, 1983; Macêdo, 2001; Madeira, 2003).

Águas com pH entre 6,5 e 7,4 são favoráveis ao desenvolvimento de colônias de ferro-bactérias como as: *Gallionellas*, *Sphaerotilus*, *Sidercapsacea* (Hackett & Lehr, 1971) e *Clonothrix*, *Crenothrix leptothrix* e *Sidercapsa* (Meneses, 1992).

As fontes de energias de colônias de ferro-bactérias no processo de oxidação são sais solúveis de ferro, os quais após a metabolização transformam-se em hidratos de ferro, formando precipitados de cor marrom que normalmente apresentam-se em forma de flocos. Esta atividade biológica causa sérios problemas em poços tubulares, provocando incrustações nas colunas filtrantes e nos conjuntos moto bomba submersíveis, com consequentes quedas de vazão. Nas estações de tratamento de água (ETA), o acúmulo de flocos acarreta a colmatação prematura das unidades filtrantes, com consequente diminuição no espaçamento entre lavagens e aumento no consumo da água de lavagem (Freitas, 2002).

De acordo com ORSATI et al. (1997) as águas muito duras, com mais de 300 mg/L de CaCO_3 , alcalinidade superior a 250 mg/L de CaCO_3 , são potencialmente incrustantes. Por outro lado, as águas de baixa salinidade, baixa alcalinidade, baixa dureza, baixo pH e elevado teor de CO_2 , são potencialmente corrosivas. Para esse autor, águas com teores de ferro acima de 1,0 mg/L, de modo geral, podem produzir incrustações.

Para as plantas e os animais, o ferro é o elemento mais importante dentre os metais de transição, por seus compostos serem responsáveis pelo desempenho de uma grande variedade de funções biológicas, estando envolvido em diversos processos (Lee, 1999) tais como: transporte de oxigênio no sangue de mamíferos, aves e peixes (hemoglobina); armazenamento de oxigênio no tecido muscular (mioglobina); transporte de elétrons em plantas e animais (citocromos) e bactérias (ferrodoxinas); componente da nitrogenase (enzima das bactérias fixadoras de nitrogênio); presente em diversas outras enzimas:

aldeído-oxidase (oxidação de aldeídos), catalase e peroxidase (decomposição de H_2O_2), e de hidrogenase succínica (oxidação aeróbica de carboidratos).

No corpo humano o ferro participa na formação de enzimas e é um dos principais componentes dos glóbulos vermelhos, que transporta oxigênio dos pulmões para os tecidos e células musculares. A sua deficiência pode causar fadiga muscular, estomatite e anemia (Siqueira et al. 2011; Feitosa et al. 1997).

O ferro em excesso pode ajudar a gerar quantidades excessivas de radicais livres que atacam as moléculas celulares, aumentando o número de moléculas potencialmente carcinogênicas dentro deles (Mahan, 2000). O acúmulo no fígado, no pâncreas e no coração pode levar a cirrose e tumores hepáticos, diabetes *mellitus* e insuficiência cardíaca (Devlin et al. 1998).

A dose diária de ferro recomendada para os homens é de 8 mg e para as mulheres é de 18 mg (Yaman & Kaya, 2004). O envenenamento por ferro é chamado de hemocromatose (Welz & Sperling, 1999).

2.5 Métodos utilizados na remoção de ferro da água

O tratamento de água contendo compostos de ferro solúveis envolve duas etapas principais: a oxidação e a remoção do precipitado formado. A oxidação pode ser realizada por processo de aeração, cloração ou permanganato de potássio (Knocke, et al. 1991). A remoção dos precipitados formados pode ser feita por filtração, decantação e flotação. A troca iônica, microfiltração e nano filtração também podem ser utilizados, entretanto, envolvem custos bem mais elevados (Moruzzi et al. 2012).

A remoção de ferro da água está fortemente relacionada à sua concentração. Os métodos convencionais aplicados na remoção de ferro, geralmente apresentam limitações para determinadas faixas de teores, aumentando-se os custos financeiros e as complicações operacionais à medida que se elevam os teores de ferro na água.

O Quadro 2 apresenta alguns métodos convencionais aplicados na remoção do ferro por faixas de teores e suas referências bibliográficas.

Quadro 2. Métodos de remoção de ferro da água por faixa de teores

Método	Teor de ferro	Referência
Aeração e filtração	Fe > 5mg/L, pH: 7,0 a 8,3	Madeira (2003); Moruzzi et al. (2012)
Cloração e filtração	Fe < 2mg/L, pH ≥ 8,5	Moruzzi et al. (2012); Wong (1984)
Aeração, decantação e filtração	Fe > 10mg/L	Madeira (2003); Moruzzi et al. (2012)
Oxidação com permanganato de potássio e filtração	Pequena/moderada concentração de Fe	Moruzzi et al. (2012)
Troca iônica	Fe < 0,5mg/L	Moruzzi et al. (2012)
Carvão ativado	Fe: 4,7 – 8,72mg/L	Stahl (1996)
Complexação	Fe < 4mg/L	Carvalho (2004)
Filtração em múltiplas etapas	Fe = 2,93mg/L	Veras et al. (2008)
Aeração com autoaspiração de ar	Fe = 4,1 mg/L	Piccin et al. (2010)

Fonte: O Autor.

2.6 Unidades litológicas portadoras de ferro no Estado da Bahia

Seguem resumidamente descritas, informações e localizações geográficas das principais unidades geotectônicas do Estado da Bahia que se tem registro de ocorrência de ferro segundo BAHIA (2012). Essas informações são relevantes na interpretação dos mapas de distribuição dos poços com altos teores de ferro por domínio hidrogeológico, que serão apresentados e discutidos no capítulo 5.

2.6.1 *Corpos máfico-ultramáficos*

São rochas escuras, com alta concentração de minerais máficos (>60% nas rochas máficas e >90% nas rochas ultramáficas), alto teor em magnésio e ferro e muito baixo teor em SiO₂. Elas apresentam importante potencial metalogenético, especialmente para mineralizações de Cr, sulfetos de Cu e Ni, Elementos do Grupo da Platina (EGP) e óxidos de Fe, Ti e V. Os principais

corpos máfico-ultramáficos nos quais o ferro encontra-se associado no Estado da Bahia são:

Complexo Máfico-Ultramáfico de Campo Alegre de Lourdes: localizado a 10 km da cidade de Campo Alegre de Lourdes, encontra-se alongado na direção N-S, com 13,6 km de comprimento e 7 km de largura. Abriga uma das maiores reservas de Fe-Ti-V do mundo, com 112 milhões de toneladas.

Complexo Máfico-Ultramáfico do Peixe: localiza-se a 20 km a oeste do Complexo de Campo Alegre de Lourdes, tem 12 km de comprimento e 4,5 km de largura.

Sill do Rio Jacaré: localizado entre os municípios de Jequié e Maracás, ocupa a borda nordeste da Sequência Metavulcanossedimentar Contendas-Mirante. Possui extensão de 70 km, largura média de 1,3 km e direção N10°E.

Corpo Peridotítico de Pedras Altas: localiza-se a 3 km a leste da cidade de Santa Luz.

Maciço do Rio Piau: encontra-se a 18 km a sudoeste do município de Tancredo Neves. Apresenta forma elíptica irregular, de aproximadamente 13 km de comprimento e 6,5 km de largura, sendo estruturado na direção NE-SW.

Maciço de Samaritana/Carapussê: localizado a nordeste da cidade de Itamari, é formado por duas intrusões próximas uma da outra. O maciço de Samaritana possui forma ovalada, com 3,5 km de comprimento e orientação aproximada N-S. O maciço Carapussê tem forma elíptica, extensão de 2,2 km e orientação também N-S.

Suíte São José do Jacuípe: é formada por vários corpos máfico-ultramáficos, ocorrentes entre as cidades de Capela do Alto Alegre e Baixa Grande, com formas irregulares, geralmente bastante alongados, frequentemente interligados, distribuídos dentro de uma faixa descontínua de direção N-S, que alcança até mais de 30 km de largura.

Maciço Mirabela: situado próximo à cidade de Ipiaú, tem formato de lopólito assimétrico, levemente alongado segundo a direção N-S, com cerca de 9 km² de área aflorante.

2.6.2 *Greenstone belts*

Cinturões portadores de associações metavulcanossedimentares com significativa expressão superficial, representável em escala cartográfica e com arranjo tectônico e estratigráfico reconhecido, com ocorrências comprovadas de: derrames ultramáficos komatíticos maciços; basaltos maciços; ocorrências de sucessões completas de derrames máficos a félsicos e; ocorrências de camadas de formações ferríferas bandadas e/ou cherts, ou jaspelitos, estreitamente associadas com derrames de komatiitos e/ou basaltos, resultantes da sedimentação química marinha em seguida aos derrames máficos e ultramáficos. Eles são repositórios de enormes concentrações de recursos minerais, principalmente de Au, Cu, Pb, Zn, Ni e Fe. Os greenstone belts identificados na Bahia são:

Greenstone belt Lagoa do Alegre: situado no norte da Bahia, nas adjacências do vilarejo de Lagoa do Alegre, no município de Casa Nova. Forma faixas retilíneas e irregulares, paralelizadas, orientadas no sentido NE-SW, com extensões variando de 4 a 62 km. A CPRM inferiu um potencial na área para o minério de ferro de 422,4 milhões de toneladas.

Greenstone belt Salitre-Sobradinho: aflora a sudoeste da cidade de Juazeiro em duas faixas. A oriental (faixa Salitre) com 33 km de comprimento, e a ocidental (faixa Sobradinho), com comprimento de 95 km.

Greenstone belt Barreiro-Columi: exposições verificadas próximas das margens do lago da represa hidrelétrica do Sobradinho, a maioria na margem sul do lago, sob a forma de faixas alongadas no sentido Leste-Oeste, com extensões variando de 4 km a 33 km, aproximadamente paralelizadas à borda norte da Chapada Diamantina. Uma parcela menor está representada pela Serra dos Colomis, na margem norte do lago, e a parte restante submersa ou formando ilhotas no interior do lago. Apresenta reserva estimada de 14,25 bilhões de toneladas de minério de ferro.

Greenstone belt Tiquara: localizado a 25 km a noroeste da cidade de Campo Formoso, na região de Tiquara, foi descoberto através de dois furos de sondagens, quando se buscava ampliar as reservas de Cr de Campo Formoso.

Greenstone belt Mundo Novo: localiza-se no centro-leste da Bahia, nas proximidades da cidade homônima, com direção aproximada N-S. Apresenta assinatura nos municípios de Piritiba, Miguel Calmon, Jacobina, Pindobaçu, Saúde, Campo Formoso, Rui Barbosa e Baixa Grande.

Greenstone belt Umburanas: encontra-se localizado no centro-sudoeste da Bahia, 22 km a leste da cidade de Brumado. Seu ramo principal tem orientação aproximada N-S, extensão de 60 km e largura variando de 0,5-4,5 km. O ramo secundário possui orientação geral NW-SE, comprimento de 13,7 km e largura variando de 3,2-5,25 km.

Greenstone belt Brumado: situa-se nas proximidades de Brumado. É representado por três faixas irregulares com extensões de até 28 km e largura máxima de 10 km, com orientação NNE.

Greenstone belt Ibitira-Ubiraçaba: ocupa considerável expressão territorial, como faixas estreitas curvilineares, alongadas, que se estendem por mais de 100 km, desde o extremo sudoeste da Chapada Diamantina, passando por Jussiape, Iguatemi, Ubiraçaba, Ibitiara, Ibiassuçê, chegando até ao sul de Caculé.

Greenstone belt Guajeru: está situado nas proximidades da cidade de Guajeru e a cerca de 50 km a sudoeste de Brumado. A estrutura principal tem forma aproximada de um “U”. Seus flancos têm forma curvilínea, alongada no sentido NW-SE, com 22 km de comprimento e 6 km de largura média (ramo do lado ocidental) e 27 km de comprimento e 3 km de largura média (ramo do lado oriental). O contorno sul da estrutura principal é uma faixa de 9 km de comprimento e 2 km de largura média.

Greenstone belt Riacho de Santana: localiza-se na borda oriental da Cordilheira do Espinhaço, nos municípios de Riacho de Santana e Bom Jesus da Lapa. Suas exposições estão distribuídas ao longo de uma faixa de direção N-S, com 84 km de comprimento e 12 km de largura média.

Greenstone belt Boquira: ocorre no lado oeste do Vale do Paramirim, com extensão de 130 km e 25 km de largura, na direção NW-SE.

Greenstone belt Serrinha-Rio Itapicuru: de direção NW-SE, tem as melhores exposições no Rio Itapicuru. Ao norte tem seu início como estreita faixa

na divisa dos municípios de Uauá e Monte Santo, passando pelo município de Quinjingue, onde se alarga e se ramifica, até atingir o município de Serrinha.

Greenstone belt Rio do Capim: ocorre a leste do município de Uauá, adjacente ao Greenstone belt Serrinha-Rio Itapicuru, com cerca de 20 km de comprimento N-S e 4 km de largura.

2.6.3 Sequências metavulcanossedimentares

São sequências similares aos greenstone belts, cuja participação de componentes vulcânicos não foi identificada, ou, quando presentes, são faixas isoladas, afetadas por metamorfismo e deformações tais que dificultam o reconhecimento e confirmação de sua natureza vulcânica. São elas:

Sequência metavulcanossedimentar Contendas-Mirante: situa-se na porção centro-sul-oriental do Estado da Bahia, entre as cidades de Contendas do Sincorá e Mirante, estendendo-se desde o município de Maracás ao norte, até o município de Anagé, ao sul. Constitui uma faixa com direção N-S, com cerca de 190 km de comprimento e 65 km de largura.

Sequência metavulcanossedimentar Caetité-Licínio de Almeida: encontra-se situada no flanco leste da Serra do Espinhaço Setentrional, sob a forma de uma faixa N-S, com cerca de 2-5 km de largura, estendendo-se por aproximadamente 70 km. Vai desde a cidade de Caetité ao norte, até a cidade de Licínio de Almeida, ao sul. Daí ela inclina para leste, indo em direção à cidade de Jacaraci. Dessa cidade, ela volta a ocupar a direção N-S, prolongando-se até alcançar a cidade de Caculé.

Sequência metavulcanossedimentar Urandi: está posicionada nas cercanias da cidade de mesmo nome, no extremo sudoeste da Bahia. As Sequências metavulcanossedimentares Caetité-Licínio de Almeida e Urandi, vêm se destacando no cenário baiano pelas recentes descobertas de importantes depósitos de minério de Fe economicamente exploráveis.

Sequência metavulcanossedimentar Ibiajara: está localizada nas imediações da localidade de Ibiajara, no município de Rio do Pires.

2.6.4 *Região da serra de Jacobina*

Associação de rochas quartzíticas e metapelíticas do Grupo Jacobina, intercaladas com unidades do Greenstone belt Mundo Novo. As intrusões máfica-ultramáficas também são encontradas nessa região. Essa associação de rochas se estende por cerca de 200 km na direção N-S, possuindo aproximadamente 10 a 15 km de largura. Seu limite meridional está situado nos municípios de Rui Barbosa e Mundo Novo e o setentrional no município de Jaguarari.

2.6.5 *Granulitos heterogêneos orto e paraderivados*

Conjunto litológico de composição diversa, destacando-se entre elas as bandas de granulitos básicos nas quais são encontradas altas concentrações de Ti, Fe e Cr. Os quartzitos portadores de granada ali presentes, ocorrem em associação, tanto com os kinzigitos (rocha rica em granada, ferro e alumínio), como com outras rochas paraderivadas tipo, formações ferríferas, grafititos e calcissilicáticas. Essa assembleia de rochas ocorre numa extensa área que passa pelos municípios de Iaçú, Milagres, Ubaira, Itaquara, Jaguaquara, Maracás, Jequié, Poções, Planalto, e entre os municípios de Laje e Gandu.

2.7 **Fatores influentes na qualidade química da água subterrânea**

A evolução da qualidade química das águas subterrâneas é influenciada por diversos fatores naturais (Fenzl, 1986). A seguir serão apresentados os fatores que foram identificados por alguns autores, aos quais a química da água subterrânea está relacionada.

2.7.1 *Clima*

Os fatores climáticos se constituem como a principal fonte de recarga dos aquíferos. Eles contribuem na formação das diversas espécies vegetais e de

solos presentes na biosfera e determinam mais do que qualquer outro fator, o tipo e a intensidade de intemperismo atuante nas rochas (Vieira et al., 1988).

No intemperismo químico, a água é o agente de maior importância, tendo como aliados os ácidos orgânicos e a temperatura. De acordo com STRAKHON (1967), a velocidade de alteração é bem maior nas regiões tropicais úmidas (Figura 4).

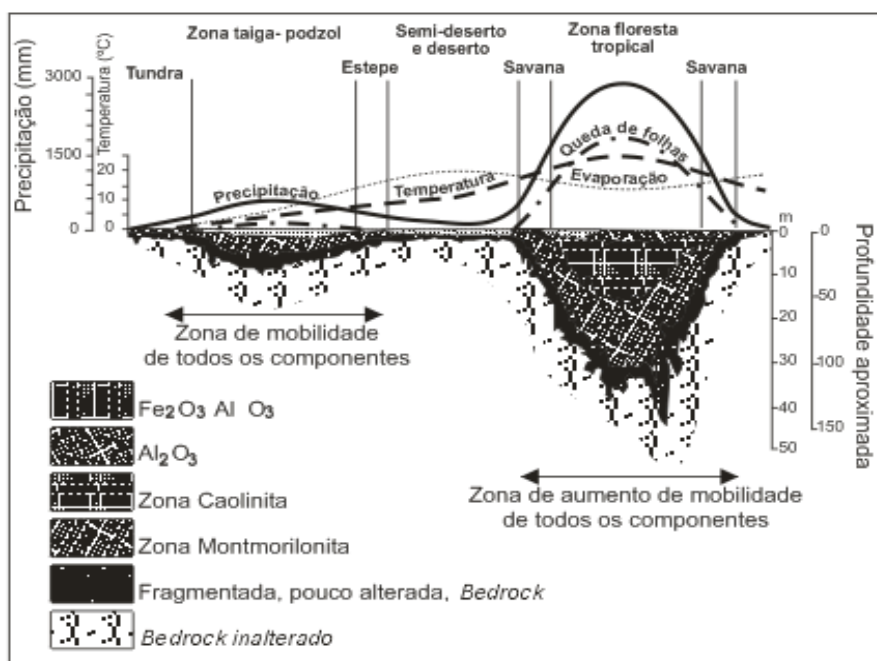


Figura 4. Esquema da disposição do manto de intemperismo em diferentes climas. Fonte: Strakhov, 1967.

Como consequência da maior pluviosidade, tem-se um manto de intemperismo mais espesso e uma sensível melhoria nas condições de recarga, influenciando na produção dos poços e qualidade química de suas águas (Guerra & Negrão, 1996).

Segundo LIMA et al. (2009) esses mantos de alteração são verdadeiras zonas aquíferas sobrepostas às fraturas, que cumprem um importante papel na hidrogeologia regional, facilitando as recargas provenientes principalmente das precipitações pluviométricas.

O ferro originalmente presente na rocha sã, em função do processo de decomposição estabelecido pelos fatores climáticos, é enriquecido

residualmente no manto (regolito) e posteriormente, pela migração das águas subterrâneas é lixiviado para os aquíferos.

De acordo com COSTA (2008), nos aquíferos fraturados cristalinos o clima tem elevada influência na qualidade da água e moderada na produção dos poços.

2.7.2 *Vegetação*

O tipo de vegetação contribui na constituição do solo e implica em diferentes comportamentos na relação solo-água. As florestas exercem importância na produção e conservação dos mananciais hídricos, com funções de interceptar a água da chuva, proporcionar melhores condições de infiltração e reduzir o escoamento superficial (Rizzi, 1985).

Segundo COSTA (2008), a vegetação está relacionada com a maior capacidade de alimentação do aquífero, por permitir maior infiltração e menor evaporação. Em zona de vegetação arbustiva, cria-se uma zona de maior umidade, com melhor taxa de infiltração e menor evaporação. Entretanto, para ele, a vegetação tem baixa influência na qualidade da água nos aquíferos fraturados cristalinos.

A grande quantidade de chuvas nas regiões úmidas e subúmidas proporcionam o crescimento de densas florestas, com maior geração de matéria orgânica e maior retenção de água no solo. O íon ferro, quando presente, tende a estar ligado ou combinado à matéria orgânica (Richter & Azevedo Netto, 1991), favorecendo, conseqüentemente, o seu enriquecimento no solo.

Para ANDRADE (2010), a vegetação também é usada como critério de prospecção de água subterrânea em aquíferos fraturados em regiões semiáridas: na época das secas a vegetação mais verdejante pode coincidir com zona de lineamentos aquíferos (Figura 5).

Nos aquíferos porosos livres, em épocas de estiagem, a vegetação verdejante também pode ser indicativa de nível freático mais raso ou de aquífero suspenso.

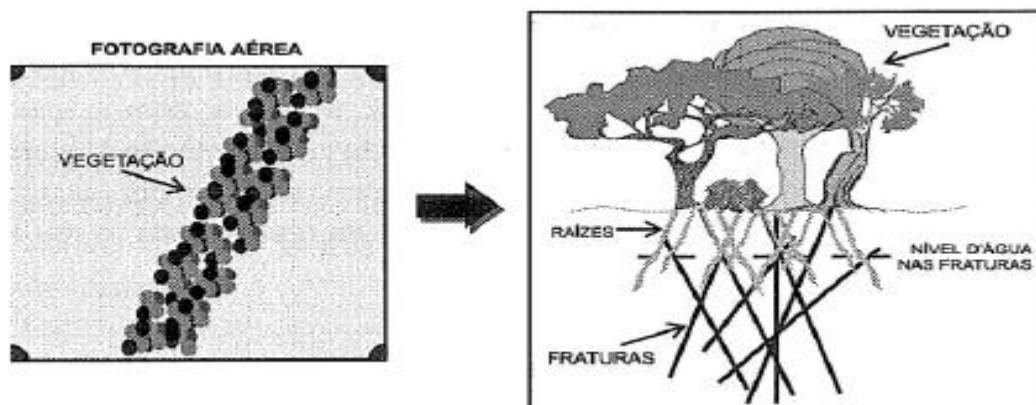


Figura 5. Relação de fraturamentos com a vegetação. Fonte: Costa Filho, 2000.

2.7.3 Litologia

De acordo com NASCIMENTO (2008), dentre vários fatores, a litologia do aquífero é um dos que exercem controle direto nas características hidroquímicas das águas subterrâneas no seu estado natural, desde que não ocorra interferência de fatores antrópicos.

A rocha matriz tem forte influência nos estágios iniciais de intemperização, decrescendo à medida que o manto de alteração evolui. Assim, o grau de decomposição da rocha matriz não só determina a eficácia das forças de intemperismo, como, também, controla e define a vegetação natural e o tipo de solo resultante (Lepsch, 2002; Brady, 1989).

O ferro, como um constituinte importante das águas subterrâneas, tem origem, principalmente, em compostos minerais do grupo dos alumino-silicatos (piroxênios, anfibólios e biotita) e sulfetos (pirita) (Lee, 1999). Conforme demonstrado no item 2.6 “Unidades litológicas portadoras de ferro no Estado da Bahia”, as áreas de ocorrência de rochas básica-ultrabásicas (corpos máfico-ultramáficos, greenstone belts, granulitos heterogêneos, sequências metavulcanossedimentares, etc.), têm maior propensão para ferro. Assim, os poços tubulares perfurados nestas unidades litológicas ou no seu entorno, têm maior possibilidade de apresentar água com altos teores de ferro do que aqueles construídos em rochas mais félsicas (quartzo-feldspáticas).

As características químicas das águas subterrâneas refletem os meios por onde percolam, guardando uma estreita relação com os tipos de rochas drenadas, tal que a composição mineralógica da rocha tem influência direta na qualidade das águas (Scopel et al. 2005). Nos aquíferos fraturados cristalinos a constituição litológica tem influência moderada na qualidade da água e baixa na produção dos poços (Costa, 2008).

2.7.4 Regolito

O solo é um material não consolidado, resultante do intemperismo físico, químico e bioquímico das rochas, situado na parte mais superficial do manto decomposto, contém ar, água, matéria orgânica, matéria inorgânica e seres vivos. Portanto, é o produto das interações da litosfera, hidrosfera, atmosfera e biosfera, com grande contribuição antrópica. O regolito é o material desagregado constituído de rocha alterada e solo (Landgraf et al., 2005).

A Figura 6 (a - b) mostra esquematicamente a interação entre a litosfera, atmosfera, hidrosfera e a biosfera, bem como a evolução rocha-regolito.

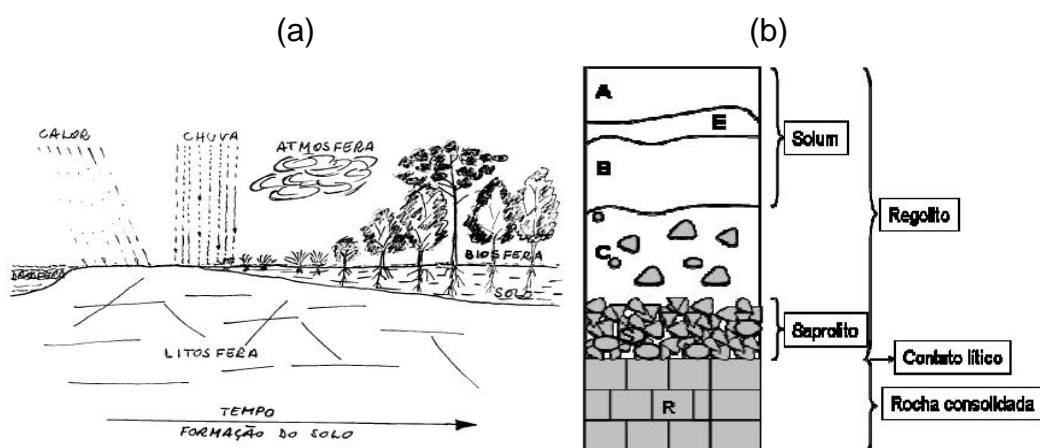


Figura 6(a). Interação entre a litosfera, atmosfera, hidrosfera e a biosfera; (b). Perfil esquemático da evolução rocha-regolito. Fonte: UFRGS, 2015.

Os minerais constituintes das rochas que se formaram em condições magmáticas, hidrotermais e metamórficas (alta temperatura e pressão), são considerados potencialmente instáveis quando expostos às condições atmosféricas (Loughnan, 1969). Para BIGARELLA et al (1994), os minerais

menos resistentes à ação da água com CO₂ dissolvido são os piroxênios, os anfibólios e as olivinas.

Os tipos de solo, bem como as suas características, são bastante variados. Um material derivado de rocha diferente dará origem a solo diferente, entretanto, material de uma mesma rocha poderá formar solos iguais ou diferentes, de acordo com o clima, a vegetação, o relevo, os organismos vivos, etc. (Vieira, 1988). Dessa forma, o solo é um sistema muito complexo e de difícil análise na sua totalidade, especialmente quando se busca associá-lo em escala regional.

Segundo COSTA (2008), nos aquíferos fraturados cristalinos o regolito tem moderada influência na qualidade da água.

A Figura 7 ilustra de forma bastante simplificada o processo de formação do solo a partir da rocha sã (a) e a alteração dos minerais primários em secundários (b).

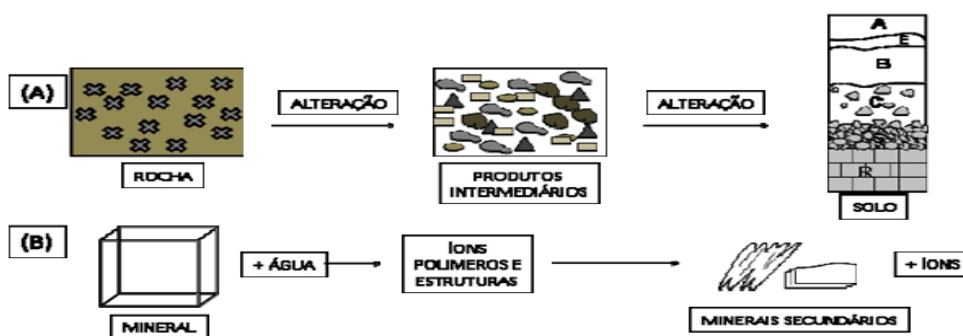
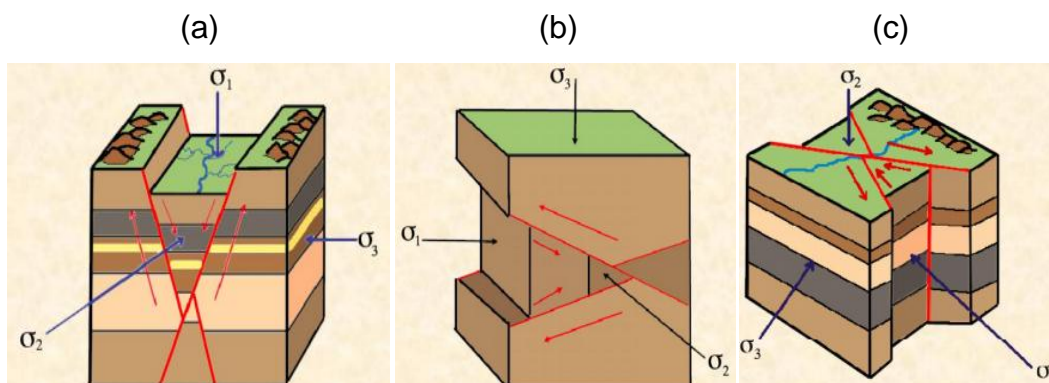


Figura 7. Representação esquemática da alteração (a) da rocha em solo e (b) de minerais primários em minerais secundários. Fonte: UFRGS, 2015.

2.7.5 Fraturamentos – profundidade de entradas de águas

As falhas e as fraturas são faixas preferenciais pelas quais as águas subterrâneas circulam, tanto no sistema aquífero cristalino como no cárstico. Quanto maior for à quantidade de fraturas, maior será a ação da água sobre a rocha (Negrão, 1987), pelo aumento da superfície exposta.

Quanto ao esforço, as fraturas são classificadas em extensionais, compressionais e de cisalhamento, Figuras 8 (a – c).



Figuras 8. Fraturas extensionais (a). Fraturas compressionais (b). Fraturas de cisalhamento (c). Fonte: Salamuni, 2015.

As fraturas extensionais são normalmente abertas e posicionadas transversalmente à direção da foliação metamórfica (orientação dos minerais), sendo originadas pelo alívio de tensão como resposta a um determinado esforço tectônico sobre a rocha. Elas são consideradas a estrutura de maior interesse nos estudos para a captação de águas subterrâneas no sistema fraturado cristalino, devido a grande incidência de poços perfurados com bons resultados de vazão.

ANDRADE (2010) cita em seu trabalho que a partir de levantamento de dados de 1006 poços tubulares perfurados na bacia do Rio Jundiá, em São Paulo, realizado por NEVES & MORALES (2006), mostrou-se que a capacidade específica dos poços perfurados em rochas cristalinas tende a diminuir com a profundidade, no entanto chama a atenção para a ocorrência de pontos com profundidades idênticas e com valores de capacidade específica muito distintos.

Já o comportamento hidráulico no meio fissural e cárstico é complexo, dado à heterogeneidade e anisotropia, principais características desses aquíferos. Todavia, apoiado na constatação desses autores é possível imaginar que, de modo geral, no sistema aquífero cristalino, os fraturamentos transversais mais próximos da superfície do terreno tendem a ser mais abertos e mais intercomunicáveis do que os sistemas de fraturas de maior profundidade, vindo a permitir que ocorram maiores fluxos de água subterrânea nesta faixa de profundidade (daí a maior capacidade específica dos poços em menor profundidade). Logo, as entradas de águas, que correspondem às profundidades

de fraturamentos, podem contribuir para a elevação dos teores de ferro nas águas subterrâneas.

Segundo COSTA (2008), no aquífero fraturado, as estruturas apresentam influência moderada na qualidade da água e elevada na produção dos poços.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Os dados que caracterizam a área de estudo, tais como; climatologia, solo, vegetação e domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia, foram compilados do Plano Estadual de Recursos Hídricos da Bahia (Bahia, 2003). Portanto, todos os parágrafos deste capítulo que não apresentam referência, foram adaptados desse Plano.

3.1 Climatologia

Segundo a classificação *Thornthwhite*, existem cinco tipos de climas básicos no Estado da Bahia: úmido, úmido a subúmido, subúmido a seco, semiárido e árido. A Figura 9 apresenta as faixas de climas no território baiano.

O clima úmido é encontrado tanto no limite oeste do Estado numa faixa com largura variando entre 20 e 80 km e chuvas médias anuais variando de 1.300 a 1.600 mm, como na maior parte do litoral, em uma faixa com largura de 18 a 65 km, onde as chuvas variam de 1.400 a 2.600 mm anuais.

O clima úmido a subúmido é encontrado em faixas contíguas às do clima úmido, onde o índice pluviométrico oscila entre 1.000 mm a 1.400 mm. Nesses dois tipos climáticos as temperaturas médias oscilam entre 22°C e 24°C. O clima subúmido a seco apresenta-se paralelo à faixa atlântica, contornando a Chapada Diamantina e nas bordas dos Chapadões Ocidentais. A precipitação média anual varia de 800 a 1.200 mm, decresce na direção do centro do Estado e as temperaturas médias variam entre 24°C e 25°C.

O clima semiárido ocorre em praticamente 70% do Estado da Bahia. Apresenta altas temperaturas, com médias mínimas acima de 25°C e precipitações inferiores a 800 mm anuais, alcançando valores abaixo de 600 mm em algumas regiões. O clima árido é encontrado no extremo norte do Estado. Nesta área ocorrem as maiores temperaturas e as precipitações oscilam entre 300 e 500 mm, concentradas em apenas três meses.

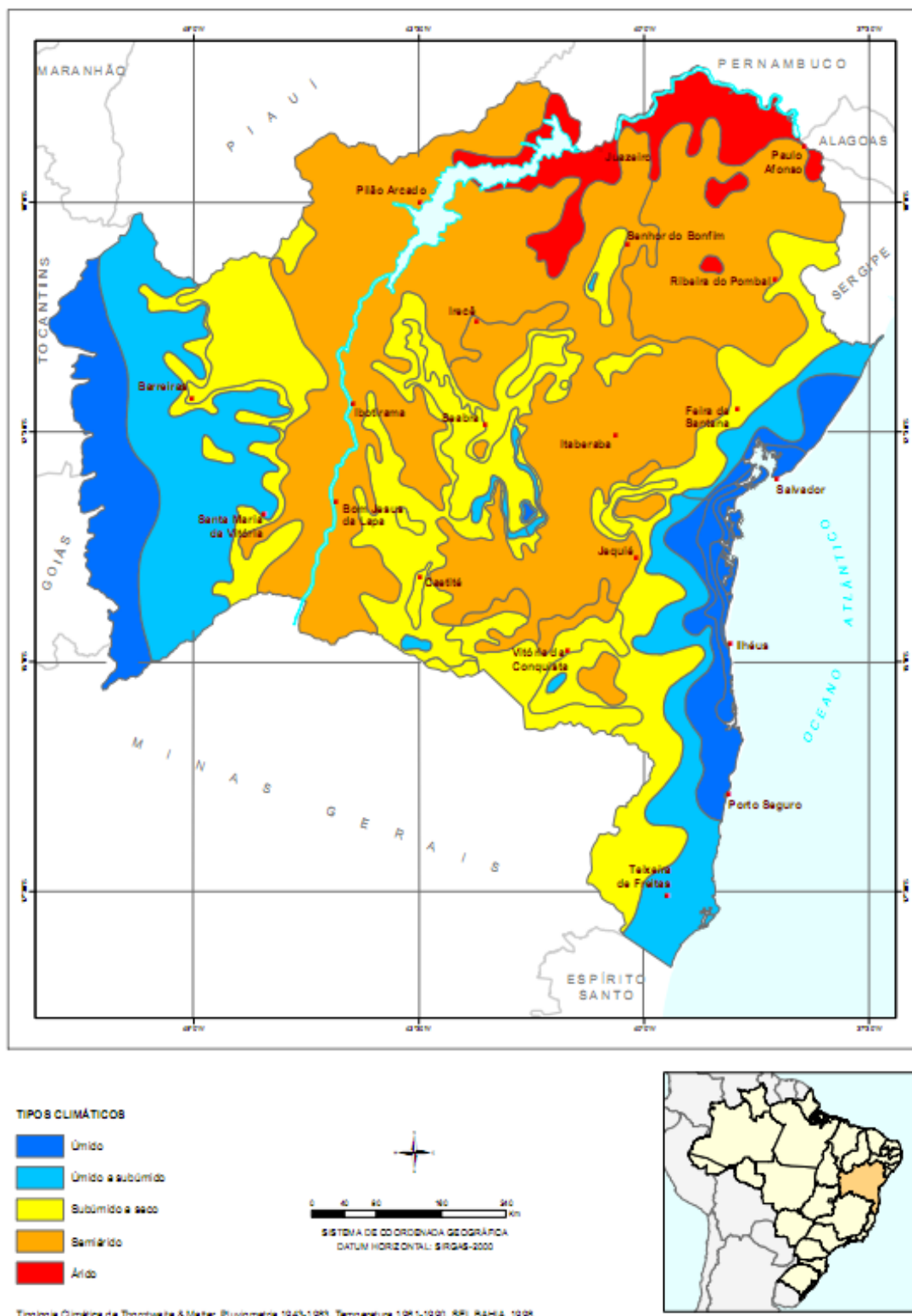


Figura 9. Mapa dos Tipos de Climas do Estado da Bahia, modificado de Bahia, 2003.

3.2 Solo

A Tabela 2 mostra a distribuição percentual das diferentes classes de solos na Bahia, em ordem decrescente de participação e suas principais características.

Tabela 2. Participação em percentual dos tipos de solos no Estado da Bahia

<i>Classe de solo</i>	<i>Descrição do solo</i>	<i>Participação (%)</i>
<i>Latossolos</i>	Profundos, medianamente drenados, textura argilosa, baixa fertilidade natural. Ocorrem em topografia plana a ondulada.	39,40
<i>Neossolos</i>	Profundos, excessivamente drenados, baixa fertilidade natural. Associam-se fortemente com os latossolos.	22,96
<i>Argissolos</i>	Profundos, bem drenados, textura arenosa, baixa fertilidade natural. Ocorrem em topografia plana a suavemente ondulada.	18,17
<i>Planossolos</i>	Apresentam horizontes A, B e C, rasos a medianamente profundos. Ocorrem em relevo plano a suave ondulado.	7,98
<i>Cambissolos</i>	Pouco profundo a profundo, fertilidade natural alta, textura argilosa. Ocorrem em relevo suave ondulado a ondulado.	6,89
<i>Chernossolos</i>	Apresentam textura média e argilosa com textura cascalhenta em alguns solos. Ocorrem em relevo suave ondulado a ondulado.	1,18
<i>Luvissolos</i>	Rasos a pouco profundos, moderadamente ácidos a neutros, mal drenados. Ocorrem em relevo suave ondulado a ondulado.	1,01
<i>Gleissolos</i>	Apresentam textura argilosa ou muito argilosa, mal drenados. Ocorrem em topografia plana, associados a cambissolos aluvionares.	0,93
<i>Vertissolos</i>	Profundos, calcários, argilosos a muito argilosos, com alguma pedregosidade, relevo muito plano.	0,71
<i>Espodossolos</i>	Profundos, com horizontes bem diferenciados, baixa fertilidade natural. Apresentam reação ácida e normalmente textura arenosa.	0,47

Fonte: Bahia, 2003.

A Figura 10 apresenta o mapa dos tipos de solos encontrados no Estado da Bahia.

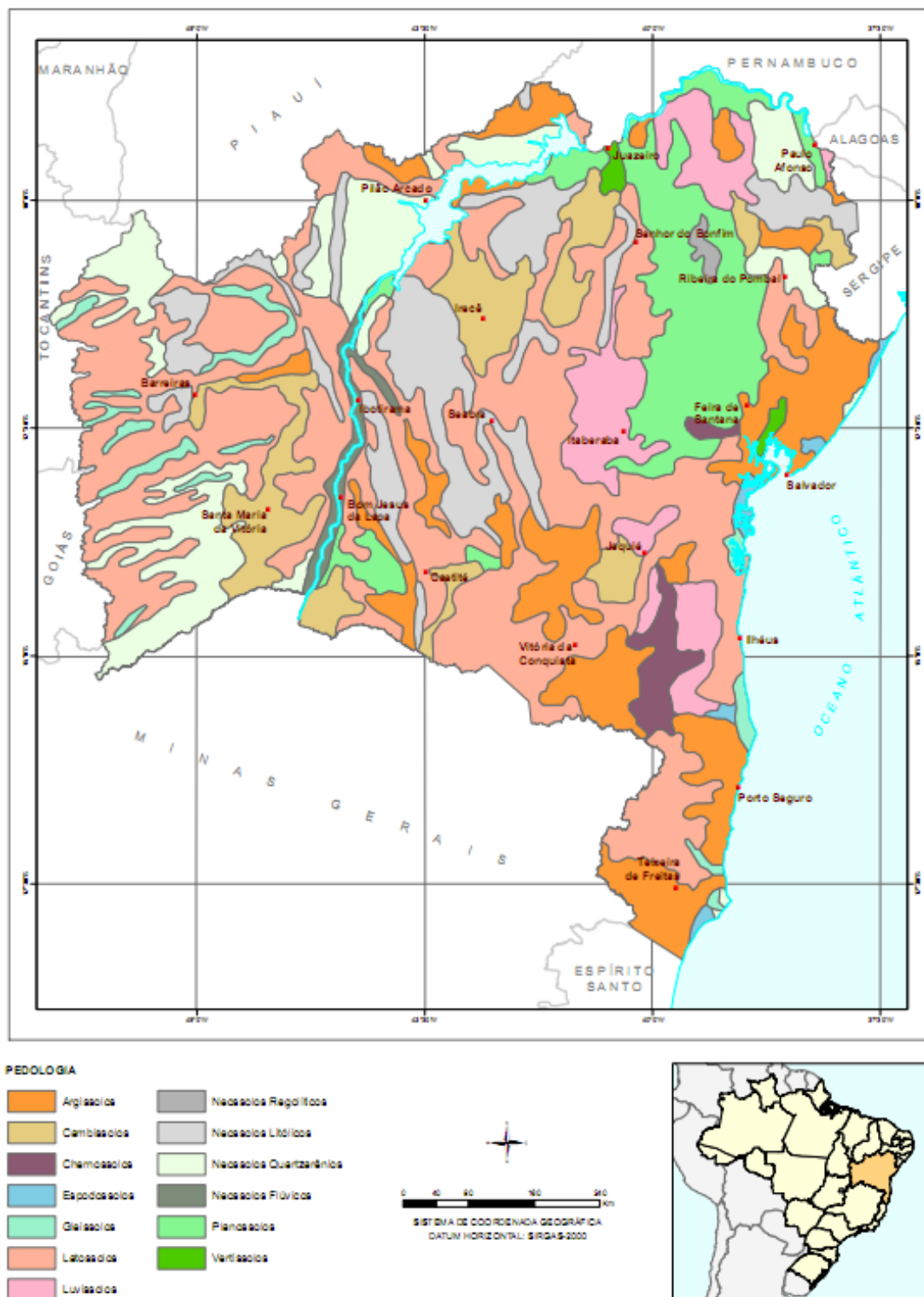


Figura 10. Mapa de Solos do Estado da Bahia, modificado de Bahia, 2003.

3.3 Cobertura vegetal

Na Figura 11 é apresentado o mapa de vegetação do Estado da Bahia por ecoregiões. Em seguida é apresentada uma breve descrição dessas ecoregiões.

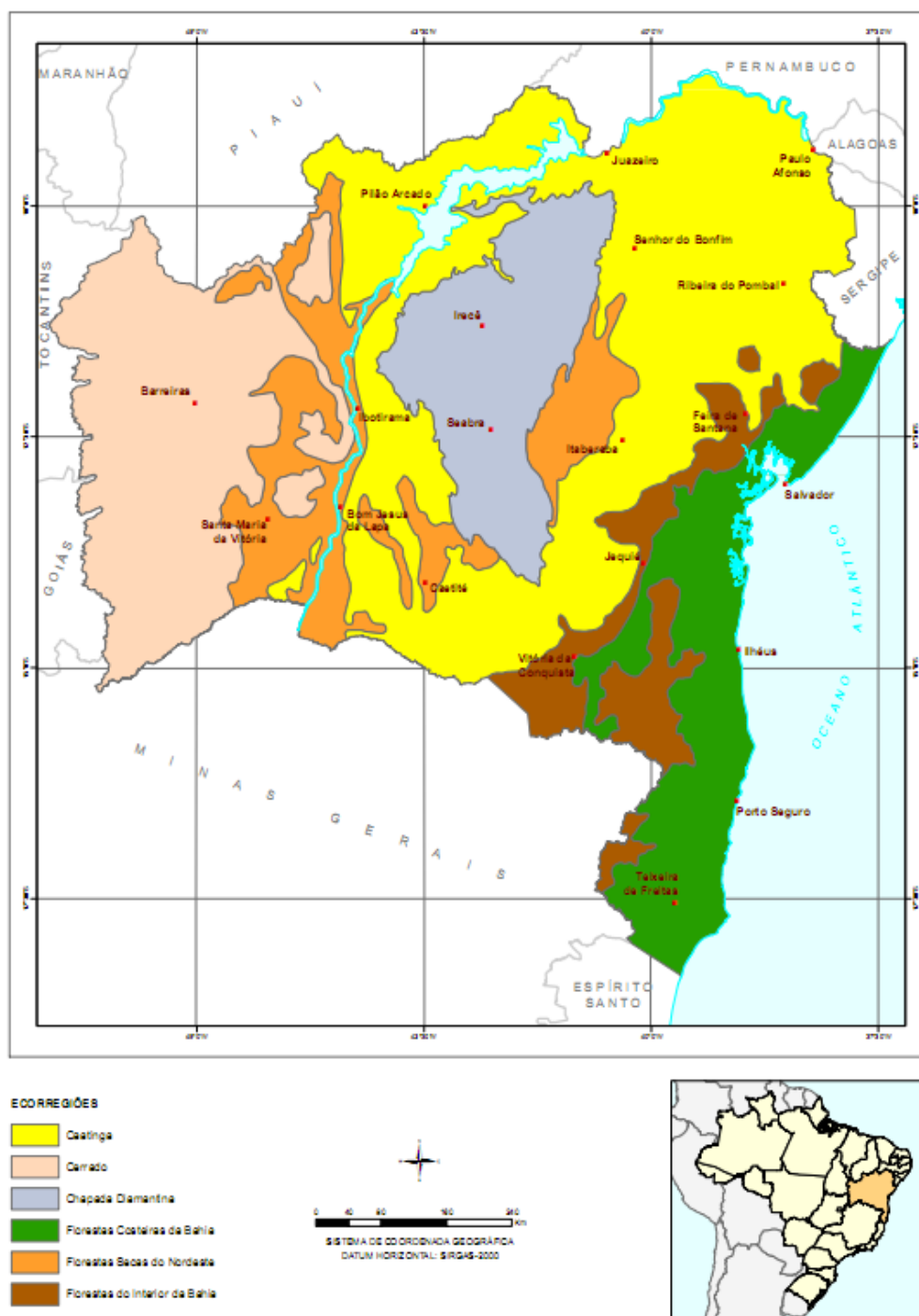


Figura 11. Mapa das ecoregiões do Estado da Bahia, modificado de Bahia, 2003.

3.3.1 *Florestas costeiras da Bahia*

As Florestas Costeiras da Bahia ou Mata Atlântica ou Floresta Ombrófila Densa é uma vegetação determinada por fatores climáticos tropicais de elevada temperatura (médias de 25°C), precipitação pluviométrica alta e bem distribuída durante o ano. Ocorre em praticamente toda a região litorânea do Estado da Bahia, incluindo a capital Salvador.

3.3.2 *Florestas do interior da Bahia*

Estas florestas correspondem às vegetações de floresta estacional semidecidual. Ocorrem em uma faixa paralela ao litoral, logo após a área de domínio das florestas costeiras da Bahia, quando a precipitação cai para índices menores de 900 mm/ano. Ela se caracteriza pela dupla estacionalidade climática: uma tropical, com época de intensas chuvas de verão, seguida por estiagem acentuada; e outra, subtropical, sem período seco, mas com seca fisiológica, provocada pelo intenso frio do inverno, com temperaturas médias inferiores a 15°C. Os municípios de Feira de Santana, Vitória da Conquista e Itapetinga, são exemplos de cidades baianas de porte médio-grande, localizadas nesse ecossistema.

3.3.3 *Florestas secas do Nordeste*

As florestas secas do Nordeste correspondem às áreas de vegetação de floresta estacional decidual. É caracterizada por apresentar duas estações climáticas bem demarcadas, uma chuvosa e outra seca, e pela vegetação onde predomina um estrato arbóreo caducifólio. Os principais centros urbanos nestas florestas na Bahia são os municípios de Bom Jesus da Lapa e Juazeiro.

3.3.4 *Caatinga*

A caatinga está incluída no semiárido e ocupa cerca de 50% do território baiano. Este ecossistema está fortemente associado ao clima, principalmente à estação seca, cujo período excede a cinco meses. Atualmente, esta formação se encontra bastante alterada devido, principalmente, ao desmatamento associado à implantação de áreas destinadas para agricultura e pecuária. As áreas ciliares, por sua aptidão agrícola, são as que sofrem os maiores impactos com a interferência antrópica. Tem sido verificado também um grande impacto sobre as áreas úmidas (brejos e várzeas), cuja cobertura vegetal natural foi reduzida devido à ampliação de áreas agrícolas em suas terras férteis e de mais fácil irrigação. As principais cidades da caatinga baiana são Senhor do Bonfim, Jacobina, Irecê, Morro do Chapéu, Guanambi e Caetité.

3.3.5 *Cerrado*

O cerrado representa uma formação com uma fisionomia típica e característica, restrita das áreas areníticas lixiviadas com solos profundos, ocorrendo em clima tropical eminentemente estacional. Sua vegetação tem aspecto tortuoso com ramificação irregular e árvores com cascas grossas. Sua florística reflete-se em uma fisionomia caracterizada por dominantes espécies arbóreas. Ocupa toda a região oeste do Estado.

3.3.6 *Chapada Diamantina*

Esta ecoregião compreende uma série de ecossistemas, destacando-se os diversos tipos de caatinga e de cerrado e sua vegetação é constituída por um mosaico de formações vegetais, de elevada diversidade biológica.

A Figura 12 (a – f) apresenta uma sequência de fotos das vegetações que ocorrem no território baiano.

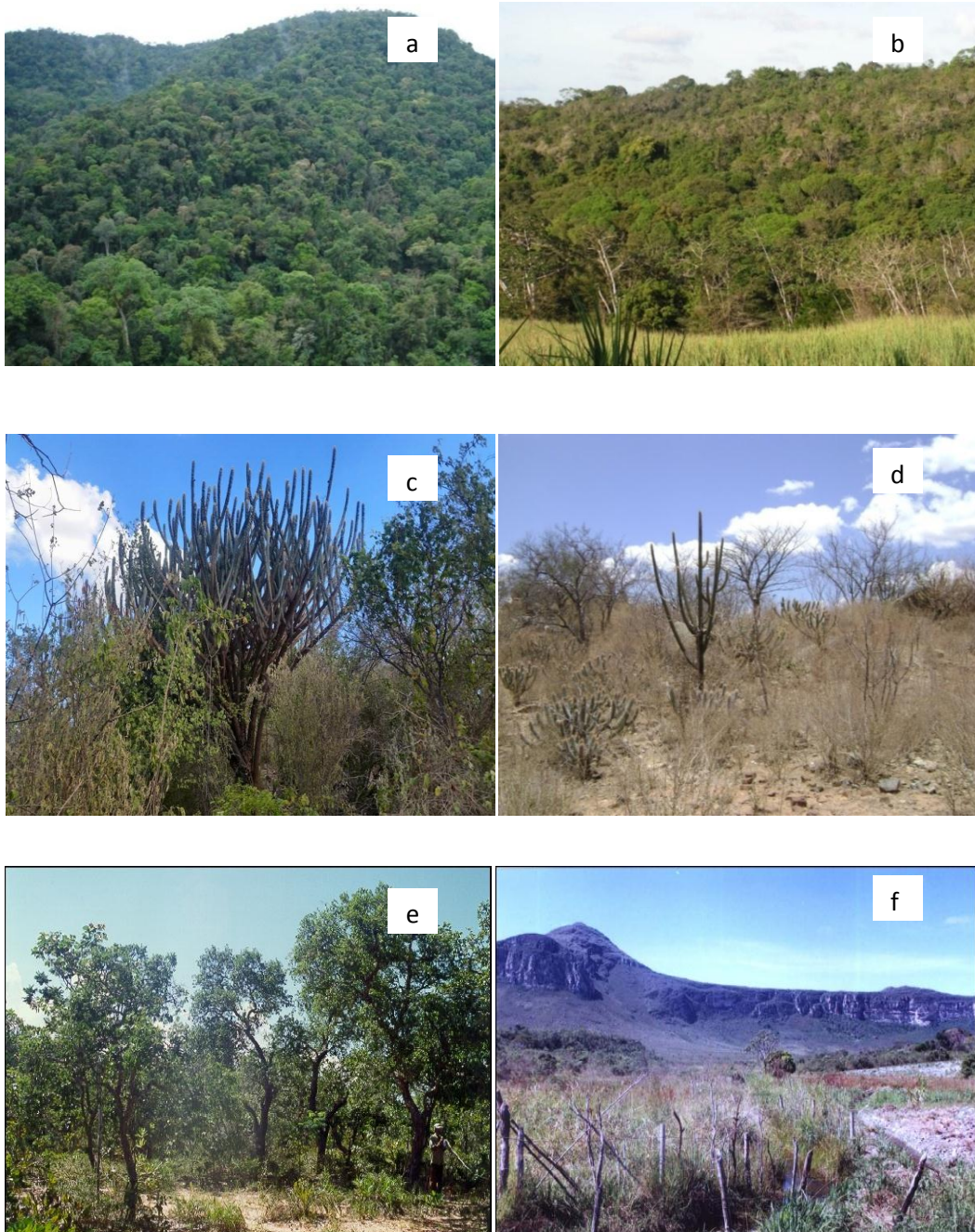


Figura 12. Tipos de algumas vegetações que ocorrem na Bahia. a) Floresta Ombrófila Densa; b) Floresta Estacional Semidecidual; c) Caatinga, período chuvoso; d) Caatinga, período seco; e) Cerrado; f) Chapada Diamantina (Negrão, 2007).

3.4 Domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia

No trabalho serão usadas definições de domínios hidrogeológicos que correspondem aos domínios aquíferos definidos por GUERRA & NEGRÃO (1996). São extensas áreas compreendidas no Estado da Bahia que, a despeito da diversidade das suas características geológicas, apresentam comportamento hidrogeológico semelhante. São cinco os domínios aquíferos: coberturas detríticas, bacias sedimentares, metassedimentos, calcários e embasamento cristalino.

Os domínios aquíferos das coberturas detríticas e das bacias sedimentares foram aqui agrupados em apenas um; domínio das rochas sedimentares, por apresentarem comportamento hidrogeológico semelhante. Portanto, os quatro domínios hidrogeológicos definidos neste trabalho são: domínio das rochas cristalinas, das rochas metassedimentares, das rochas calcárias e domínio das rochas sedimentares.

A Figura 13 apresenta o mapa de descrição dos domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia, modificado de GUERRA & NEGRÃO (1996).

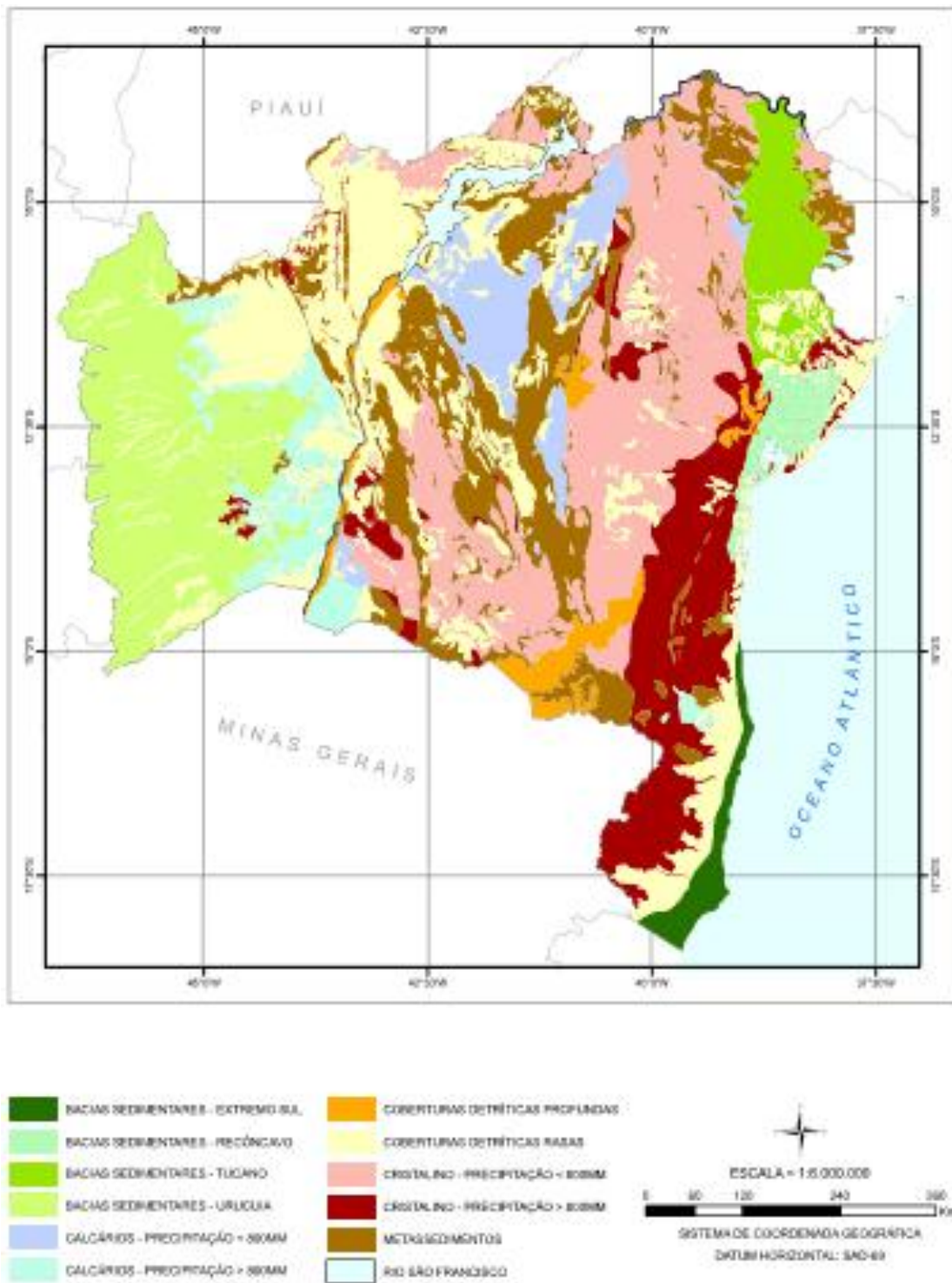


Figura 13. Mapa dos domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia. Fonte: Bahia, 2003, mod. Guerra & Negrão 1996.

O Quadro 3 apresenta um resumo das reservas e potencialidades, por regiões aquíferas, no território baiano segundo GUERRA & NEGRÃO (1996).

Quadro 3. Reservas e potencialidades das águas subterrâneas da Bahia

Regiões Aquíferas	Reserva Permanente (m ³)	%	Potencialidade		%
			m ³ /ano	m ³ /s	
Bacia sedimentar	3,2 10 ¹²	92	3,1 10 ¹⁰	995,3	69,1
Coberturas detríticas	5,9 10 ¹⁰	1,7	8,7 10 ⁹	275,9	19,2
Calcários	2,0 10 ¹¹	5,7	2,9 10 ⁹	91,8	6,4
Metassedimentos	8,1 10 ⁹	0,23	9,0 10 ⁸	29,5	2,1
Embasamento cristalino	1,3 10 ¹²	0,36	1,5 10 ⁹	47,0	3,2
Totais	3,5 10¹²	100	4,5 10¹⁰	1,435,5	100

Fonte: modificado de Negrão, 2007.

3.4.1 Domínio das rochas cristalinas

Ocupando uma área de 201.600 km² do Estado, este domínio é constituído de aquíferos livres, de natureza essencialmente fissural ou fraturada, pouco profundo, de baixa capacidade de armazenamento, baixa permeabilidade, heterogêneo e anisotrópico.

O domínio das rochas cristalinas encontra-se dividido quanto à pluviometria em dois grupos: precipitação anual superior 800 mm e precipitação anual inferior a 800 mm (Negrão, 2008).

Nas regiões onde ocorrem precipitações anuais inferiores a 800 mm a capacidade média de produção dos poços é estimada em 3,41 m³/h. Nas regiões de pluviometria anual acima de 800 mm a capacidade média de produção dos poços aproxima-se de 4,00 m³/h.

3.4.2 Domínio das rochas metassedimentares

A Bahia tem aproximadamente 15% de sua área (84.300 km²) mapeada como metassedimentos. O sistema aquífero das rochas metassedimentares é

representado no Estado pelas regiões do Espinhaço Setentrional e da Chapada Diamantina, com precipitações pluviométricas acima de 800 mm/ano.

Os metassedimentos formam aquíferos livres de natureza fissural e fraturada, similarmente aos aquíferos cristalinos. Diferenciam-se destes, entretanto, por vazões mais elevadas e por menor salinização de suas águas, em parte, devido à sua composição litológica rica em quartzo e, por ocorrerem em regiões de topografia e pluviosidade elevadas (Oliveira et al. 2007).

3.4.3 Domínio das rochas calcárias

Os calcários ocorrem em aproximadamente 14% da área do Estado (77.900 km²). Eles formam aquíferos de elevada heterogeneidade e anisotropia, livres e com capacidade de armazenar consideráveis volumes de água, a depender fundamentalmente do regime pluviométrico da região.

No Estado, as rochas carbonatadas do Grupo Una que ocorrem nas regiões da Chapada de Irecê e Vale do rio Salitre, são as que recebem chuvas médias anuais inferiores a 800 mm. Já os calcários Bambuí Oeste do Rio São Francisco e outras áreas menores, estão em áreas de pluviometria superior a 800 mm/ano.

3.4.4 Domínio das rochas sedimentares

Na Bahia, o domínio das rochas sedimentares é representado pelas Bacias Sedimentares do Recôncavo, Tucano, Urucuia e pelas Coberturas Detríticas Tércio Quaternárias.

A Bacia do Recôncavo compreende cerca de 10.500 km² de área do Estado e tem como os mais importantes aquíferos, os arenitos da Formação Sergi em sua base e o sistema aquífero superior São Sebastião/Marizal. Pela excelente qualidade química e grande capacidade de produção dos poços perfurados no sistema aquífero superior, suas águas vêm sendo exploradas em larga escala, havendo poços tubulares com 450 m de profundidade e com vazões superiores a 350 m³/h.

A Bacia Sedimentar do Tucano tem cerca de 30.000 km² de área e está dividida em três sub-bacias: Tucano Sul, Tucano Central e Tucano Norte. Os principais reservatórios de águas subterrâneas desta bacia são os aquíferos Sergi, Ilhas e o sistema aquífero superior Massacará/Marizal. A grande extensão territorial e as excelentes condições de armazenamento fazem desta Bacia uma das maiores reservas de água subterrânea do Estado.

O aquífero Urucuia ocupa uma área aproximada de 120.000 Km², com cerca de 80% dela compreendida na região Oeste do Estado da Bahia e o restante fora do Estado. Comporta-se como tipicamente livre, apresentando às vezes características compatíveis com o tipo semi-confinado, com recarga em toda a extensão areal, sendo maior no sentido oeste-leste. Este aquífero apresenta alta potencialidade hidrogeológica, confirmada pelas elevadas vazões de seus poços e excelente qualidade de suas águas.

As coberturas detríticas dividem-se em coberturas rasas e profundas, ocorrendo em aproximadamente 15% da área do Estado (88.273 km²). As coberturas rasas são depósitos detríticos formados pelas areias de dunas, aluviões e outros, de pequenas espessuras.

Os sedimentos Barreiras, considerados como coberturas profundas, na região do extremo sul do Estado podem alcançar espessura de até 150 metros, com poços perfurados apresentando vazões superiores a 50m³/h, atribuindo ao aquífero, potencialidade hidrogeológica média a alta.

3.5 Resumo dos fatores naturais por domínios hidrogeológicos

Este item apresenta a revisão bibliográfica sobre os aspectos da geologia e domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia, seu clima, pluviometria, solo e vegetação. Como algumas destas variáveis serão consideradas para avaliar os fatores influentes na concentração de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia, foi elaborado um quadro resumo na forma de características dos fatores naturais por domínio hidrogeológico expandido, e apresentado a seguir no Quadro 4.

Quadro 4. Características dos fatores naturais por domínio hidrogeológico expandido do Estado da Bahia

Domínio hidrogeológico	Clima	Pluviometria (mm/ano)	Solo	Vegetação/ecoregião
Calcário Oeste	Subúmido a seco e semiárido	1100 – 800	Cambissolos	Florestas secas do Nordeste
Calcário Irecê	Semiárido	800 – 500	Cambissolos	Caatinga
Cristalino Sudoeste	Semiárido	800 – 500	Latossolos, argissolos e planossolos	Caatinga e florestas secas do Nordeste
Cristalino Sul	Úmido a subúmido, subúmido a seco	1600 – 500	Latossolos, argissolos e chernossolos	Mata atlântica e florestas do interior da Bahia
Cristalino Centro Norte	Semiárido e árido	500 – 400	Planossolos	Caatinga
Sedimentar Bacia do Tucano	Semiárido e árido	500 – 400	Luvissolos, neossolos e planossolos	Caatinga
Sedimentar Bacia do Recôncavo	Úmido, úmido a subúmido e subúmido a seco	2600 – 1100	Argissolos	Mata atlântica e florestas do interior da Bahia
Sedimentar Litoral Sul	Úmido e úmido a subúmido	2600 – 1100	Latossolos, argissolos	Mata atlântica
Sedimentar Urucuia	Úmido e úmido a subúmido	2000 – 1100	Latossolos e neossolos	Cerrado
Metassedimentar	Subúmido a seco	1100 – 600	Neossolos e latossolos	Chapada Diamantina

Fonte: O Autor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Cadastro de poços tubulares

Para o levantamento dos poços tubulares profundos foi utilizado o Banco de Dados Hidrogeológicos da empresa, CERB (2014), com cerca de vinte e três mil e quatrocentos poços tubulares cadastrados, dos quais, quinze mil e setecentos poços foram construídos diretamente pela CERB e por empresas contratadas, mas, sob a sua fiscalização. A compilação dessa base de dados foi construída em planilhas do Excel.

Os dados de construção dos poços são armazenados na “Ficha de Poço”, sendo parte integrante do Banco de Dados Hidrogeológicos. Nela constam as seguintes informações: número de cadastro CERB e Corpore, data da perfuração e do teste de bombeamento, tipo de rocha e de aquífero, equipamento de perfuração, empresa executora, nome do técnico responsável pela locação e pela execução, coordenadas, profundidade, diâmetros de perfuração e de revestimento, material de completação, descrição litológica, entradas de água (aquíferos fissural e cárstico), posições de filtros (aquífero poroso), cimentação anelar, vazão de teste, nível estático, nível dinâmico e recuperação. Neste trabalho foram consultadas 3.539 destas fichas para o levantamento de dados necessários para estudar o comportamento do ferro nas águas subterrâneas, nos diversos domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia.

A Figura 14 mostra um exemplo da Ficha de um poço perfurado na localidade de Lagoa da Vaca, no município de Conceição do Coité.

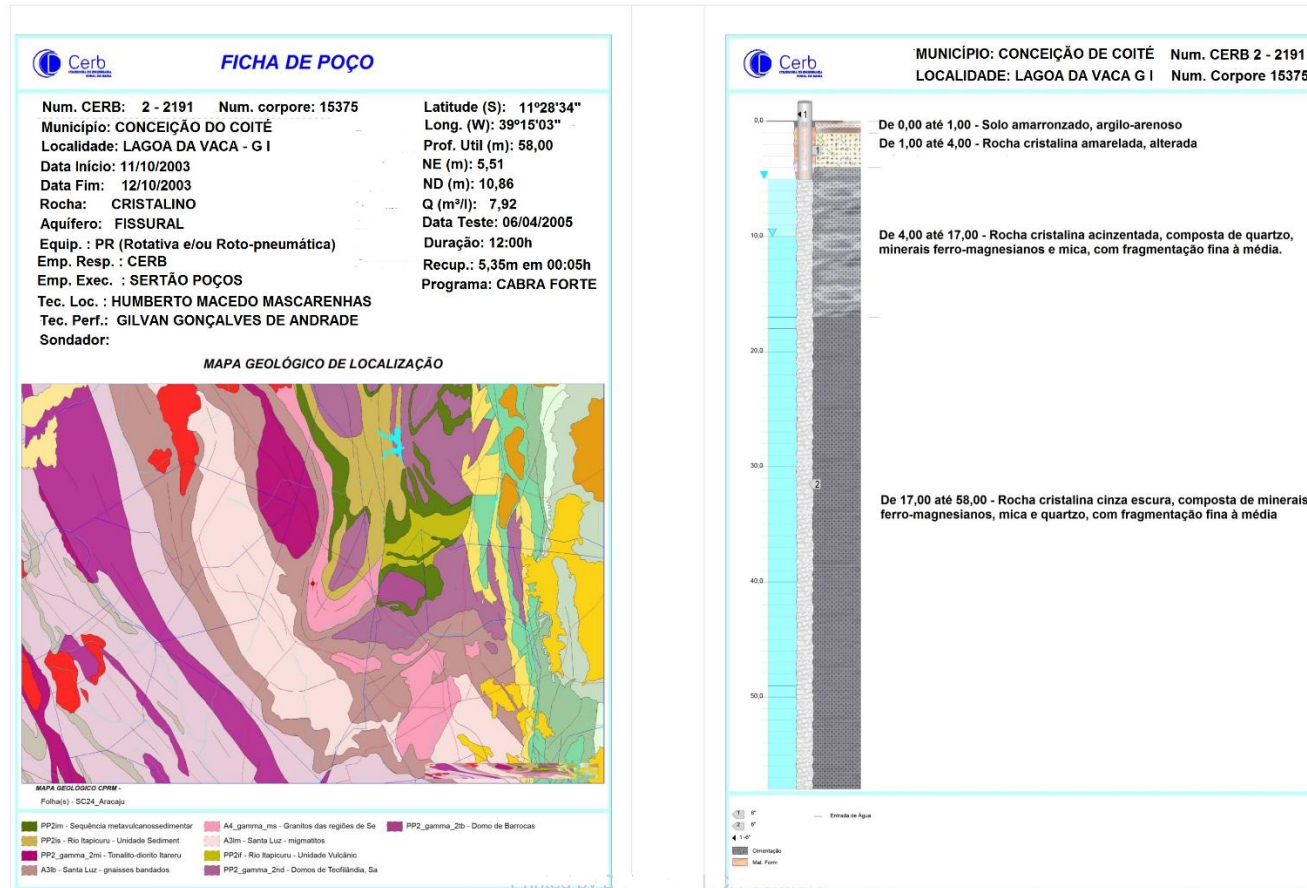


Figura 14. Ficha do poço de Conceição do Coité – Lagoa da Vaca. Fonte: Cerb, 2014.

Os dados foram organizados em planilhas após a aplicação de um processo de filtragem de informação eletrônica. A primeira classificação e filtragem foi a de intervalo de tempo. Estabeleceu-se o período de 2003-2013, pelo número significativo de perfurações de poços tubulares realizadas no Estado da Bahia, e pela confiabilidade de localização dos poços por estarem georreferenciados.

Nessa fase foram selecionados todos os poços perfurados e cadastrados, independentemente do resultado de vazão. Esses poços estão distribuídos segundo as empresas executoras em CERB, contratadas e terceiros, sendo cadastrados como Cerb1, Cerb2 e Cerb3, respectivamente.

Prosseguindo com o levantamento foi realizada uma segunda filtragem para selecionar dos poços Cerb1 e Cerb2 aqueles com vazões de teste de bombeamento $\geq 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, para melhor adequá-los às condições normalmente exigidas para a implantação de sistemas simplificados de abastecimento de água a partir de captação subterrânea. Os poços Cerb3 foram descartados por apresentarem dados construtivos e litológicos inconsistentes e/ou incompletos.

A partir dos resultados dessas primeiras filtrações, foi avaliada a consistência dos dados das análises físico-químicas das águas. Nessa fase foram identificados diversos Laudos de Análises de Água incompletos, ou seja, sem dados de alguns dos parâmetros físico-químicos que terão avaliada a sua relação com o elemento ferro. Os poços cujas análises de água se enquadraram nessa condição foram também descartados.

A seleção de laudos completos de análise de água teve como objetivo reunir a maior quantidade possível de parâmetros físico-químicos, necessária para avaliar o grau de relacionamento entre eles e o ferro. Os parâmetros selecionados foram: cor aparente, turbidez, pH, condutividade elétrica, dureza total, sólidos totais dissolvidos, cloreto, alcalinidade total, cálcio, fluoreto, magnésio, nitrito, nitrato, sílica e sulfato.

Os poços com vazão de teste de bombeamento $\geq 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e laudo da análise físico-química da água completo foram divididos em dois grupos: a) poços contendo água com concentração de ferro $\leq 0,3 \text{ mg/L}$ e b) aqueles com valores de ferro acima desse parâmetro. Embora o primeiro grupo de poços

apresente água subterrânea de qualidade para o consumo humano quanto ao teor de ferro, eles foram utilizados no tratamento estatístico (distribuição de classes e construção de histogramas), bem como na confecção dos mapas de localização dos poços perfurados e de contorno de teores de ferro, para melhor visualização e mais correlação da distribuição dos teores de ferro nas águas subterrâneas do Estado da Bahia,

Os 940 poços com teores de ferro > 3 mg/L, que são o objeto principal da pesquisa, foram classificados por municípios/localidades, dados construtivos dos poços e de suas respectivas análises físico-químicas da água e armazenados em planilhas.

4.2 Análises físico-químicas

As análises físico-químicas, já constantes no Cadastro de Poços da CERB, foram realizadas no Laboratório do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica (LABDEA-UFBA) e no Laboratório de Química do SENAI-CETIND, logo após a perfuração de cada poço. Assim sendo, as análises ocorreram desde 2003 até 2013.

O processo de amostragem e acondicionamento das amostras de águas subterrâneas é realizado da seguinte forma: as amostras de águas são coletadas diretamente dos poços, na época de suas construções. Elas são acondicionadas em vasilhames plásticos de 5000 ml, após um processo longo de bombeamento. O bombeamento é de 12 horas ininterruptas para os poços perfurados em rochas cristalinas, calcárias e metassedimentares, e de 24 horas para os poços construídos em rochas sedimentares. As amostras de água são submetidas à análise de acidez total, alcalinidade (bicarbonato, carbonato e hidróxido), cálcio total, cloretos, condutividade elétrica, cor aparente, dureza total, ferro total, fluoretos, magnésio total, nitratos, nitritos, pH, potássio, sílica reativa, sódio, sólidos totais, sulfatos e turbidez. Todos os ensaios são realizados em temperatura ambiente, num intervalo máximo de 15 dias entre a coleta e a análise.

Os métodos utilizados para efetuar as análises dos parâmetros e os limites de detecção praticados pelos laboratórios LABDEA e SENAI-CETIND, com o uso da metodologia da *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* e das normas publicadas pela ISO (*International Standardization Organization*) estão demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3. Modelo de Laudo do Laboratório do Departamento de Engenharia Ambiental – LABDEA e do Laboratório de Química do SENAI-CETIND

Ensaio	Unidade	L1	SENAI-CETIND		LABDEA	
			LDM	Método	LDM	Método
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	--	1,1	EN 001 QGI (SMEWW 2310 A/B)	3,0	SM 2310B 21ªEd
Alcal. Bicarbonato	mg/L CaCO ₃	--	2,5	EN 003 QGI (SMEWW 2320 A/B)	3,0	SM 2320B 21ªEd
Alcal. Carbonato	mg/L CaCO ₃	--	2,5	EN 003 QGI (SMEWW 2320 A/B)	3,0	SM 2320B 21ªEd
Alcal. Hidróxido	mg/L CaCO ₃	--	2,5	EN 003 QGI (SMEWW 2320 A/B)	3,0	SM 2320B 21ªEd
Cálcio	mg/L CaCO ₃	--	0,2	EN 111 ESP (ASTM D 511-03B)	3,0	SM 3500-Ca B 21ªEd
Cloretos	mg/L Cl	250	0,010	EN 138 QGI (EPA 300.1)	3,0	SM 4500-Cl B 21ªEd
C. Elétrica	µS/cm	--	0,1	EN 030 QGI (SMEWW 2510 A/B)	--	SM 2510B 21ªEd
Cor aparente	mg/L Pt-Co	15	5	M QGI 011 (SMEWW 2120 A/B)	5,0	SM 2120B 21ªEd
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	500	2,0	M QGI 097 (SMEWW 2340 B)	3,0	SM 2340C 21ªEd
Ferro Total	mg/L Fe	0,3	0,03	EN 102 ESP (ASTM D 1068-03)	0,10	SM 3500-Fe B 21ªEd
Fluoretos	mg/L F	1,5	0,001	EN 138 QGI (EPA 300.1)	0,02	SM 4500-F D 21ªEd
Magnésio	mg/L Mg	--	0,3	EN 112 ESP (ASTM D 511-03)	--	SM 3500- Mg B 21ªEd
Nitratos	mg/L N-NO ₃	10	0,0004	EN 138 QGI (EPA 300.1)	0,01	SM 4500- NO ₃ E 21ªEd
Nitritos	mg/L N-NO ₂	1,0	0,002	EN 138 QGI (EPA 300.1)	0,005	SM 4500- NO ₂ B 21ªEd
pH	--	6,0 a 9,5	--	EN 029 QGI(SMEWW 4500 H+ B)	--	SM 4500-H B 21ªEd
Sílica reativa	mg/L SiO ₂	--	0,1	M QGI 035 (SMEWW 4500 Si)	1,0	SM 4500C SiO ₂ 21ªEd
Sólidos Totais	mg/L	200	0,3	EN 113 ESP(ASTM D 4191-03)	10	SM 2540B 21ªEd
Sulfatos	mg/L SO ₄	250	0,002	EN 138 QGI (EPA 300.1)	1,5	SM 4500- SO ₄ E 14ªEd
Turbidez	NTU	5	0,64	EN 021 QGI (SMEWW 2130 B)	--	SM 2130B 21ªEd

Nota: (L1): Potabilidade 2914/11. SM: Standard Methods. L1: Limite Máximo Permitido. LDM: Limite de Detecção do Método. Fonte: modificado de LABDEA e SENAI-CETIND, 2007.

4.3 Confeção de mapas

Os mapas de localização dos poços bem como os de contorno dos teores de ferro, foram confeccionados com o objetivo de apresentar de forma simples e compreensível a distribuição dos altos teores de ferro nas águas subterrâneas do Estado da Bahia.

Para a elaboração dos mapas foi utilizada, além da base de dados da CERB (Banco de Dados Hidrogeológicos), as seguintes folhas geológicas publicadas pela CPRM em escala ao milionésimo: SC24 Aracajú, SD24 Salvador, SE24 Rio Doce, SC23 São Francisco e SD23 Brasília.

Tratando-se, portanto, de um levantamento de caráter regional, utilizou-se o software de geoprocessamento ArcGIS para edição de arquivos no formato Shapefile e posterior criação dos *layouts*. Este software foi usado para manipulação dos dados, auxiliando na interpretação, análise e apresentação dos resultados. Foi utilizado o método de interpolação por IDW (*Inverse Distance Weighted*) para espacializar as amostragens dos teores de ferro no território baiano como também nos domínios hidrogeológicos. No ArcGIS 9.3, através do comando *Georeferencing Wizard*, também pôde-se gerar mapas de contorno dos teores de ferro.

Os mapas obtidos como resultados dessas ferramentas foram: i) de localização dos 3.539 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, por município do Estado da Bahia; ii) de contorno de teores de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia; iii) de localização dos 1.688 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, no domínio hidrogeológico das rochas cristalinas; iv) de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, por tipo de clima, no compartimento Cristalino Centro-Norte; v) de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, por tipo de clima, no compartimento Cristalino Centro-Sul; vi) de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, por tipo de clima, no compartimento Cristalino Sudoeste; vii) de localização dos 697 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, no domínio hidrogeológico

das rochas metassedimentares; viii) de localização dos 494 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, no domínio hidrogeológico das rochas sedimentares; ix) de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, no compartimento Bacia do Tucano; x) de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, no compartimento Bacia do Recôncavo-Camamu; xi) de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, no compartimento Sedimentos Litorâneos; xii) de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, no compartimento Urucuia; xiii) de localização dos 660 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, no domínio hidrogeológico das rochas calcárias; xiv) de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, no compartimento dos calcários da Chapada Diamantina; xv) de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0\text{m}^3/\text{h}$, no compartimento dos Calcários do Oeste. Os resultados da espacialização dos dados de teores de ferro estão apresentados no capítulo 5, nos mapas das Figuras 19 a 32.

4.4 Campanhas de campo

Primeira etapa: essa etapa foi realizada em abril de 2015 e consistiu em visitar localidades situadas em áreas cujas águas subterrâneas são enriquecidas em ferro e o abastecimento de água à população, através de poço tubular construído pela CERB, exige um sistema de remoção do ferro. As localidades visitadas foram: Santo Antônio, localizada em Santa Cruz de Cabrália; o Assentamento Coari Terra, no município de Santa Luzia e a localidade de Chapadinha, no município de Ibirapuã.

Em Santo Antônio o poço tubular é para atender a uma população fixa de 2.500 habitantes, mas que é fortemente aumentada nos períodos de alta estação, devido ao turismo. Este sistema foi construído com bandejas aeradoras e filtros. Já nas localidades de Chapadinha e Assentamento Coari Terra, que são pequenas comunidades, com populações de 100 e 200 habitantes, foram

instalados apenas filtros para remover o ferro da água, não havendo necessidade de bandejas aeradoras.

A Figura 15 mostra uma sequência de fotos que ilustram os três sistemas de abastecimentos construídos e equipados pela CERB: da localidade de Santo Antônio, no município de Santa Cruz de Cabralia (15a – 15d), da comunidade de Assentamento Coari Terra, em Santa Luzia (15e – 15f) e de Chapadinha, em Ibirapuã (15g – 15h).



Figura 15. Sistemas de abastecimento de água instalados com equipamentos para remoção de ferro da água em: Santo Antônio (a –b); Assentamento Coari Terra (c – d) e Chapadinha (e – f). Fonte: O Autor.

Segunda etapa: Essa etapa foi realizada em junho de 2015 e teve como finalidade visitar poços com altas concentrações de ferro na água, perfurados no domínio das rochas cristalinas, para avaliar os critérios de locação empregados e as características da rocha investigada. As localidades visitadas foram: Lagoa da Vaca e Balaio, no município de Conceição do Coité.

A localidade de Lagoa da Vaca se destaca por apresentar uma concentração de ferro na água de 29,90 mg/L. O poço foi locado pelo geólogo Humberto Macedo Mascarenhas (CERB), sobre rochas do complexo greenstone belt Serrinha-Rio Itapicuru, com exposições laterais da sequência de metavulcanossedimentar, unidade sedimentar, unidade vulcânica, gnaisses bandados, tonalito-diorito, granitos, migmatitos e domos.

A Figura 16, através de uma sequência de fotos ilustra o local visitado. O poço de Lagoa da Vaca instalado para dessedentação animal (16a), o geólogo Humberto Mascarenhas revisitando o local e reavaliando a locação (16b), corte da encosta do riacho contendo exposição da rocha matriz, manto de alteração e solo (16c) e (16d) e afloramentos de rochas do complexo greenstone belt de Serrinha-Rio Itapicuru com exposição de lineamentos e de fraturamentos (16e) e (16f).



Figura 16. Sequência de fotos do local do poço de Lagoa da Vaca – Conceição do Coité. a) Poço instalado para dessedentação animal; b) O geólogo Humberto revisitando o local; c - d) Corte da encosta com exposição da rocha matriz, manto de alteração e solo; e – f) afloramentos de greenstone belt com lineamentos e fraturamentos. Fonte: O Autor

4.5 Tratamento estatístico dos dados

4.5.1 Estatística descritiva

Utilizando-se de técnicas da estatística descritiva foi possível organizar e sumarizar os dados obtidos das análises físico-químicas das amostras de águas subterrâneas selecionadas para estudo. Esses dados foram compartimentados em intervalos de classes, e, em seguida, foram encontradas as medidas de tendência central: média, mediana e moda, como também as medidas de dispersão: desvio padrão e valor máximo e mínimo da amostra, para a construção de histogramas.

Foram construídos dois tipos de histogramas para representar a distribuição dos teores de ferro da água subterrânea no território baiano: um para teores de ferro acima de 0,3 mg/L e outro para teores acima e abaixo de 0,3 mg/L, devido ao grande volume de dados com baixos teores de ferro. A construção de dois histogramas teve como objetivo comparar os resultados.

4.5.2 Análise de correlação bivariada

Em estudos que envolvem mais de uma variável, a estatística descritiva pode ser usada para descrever o relacionamento entre os pares de variáveis. A representação gráfica via gráfico de dispersão é uma forma simples de verificar o tipo de correlação existente entre duas variáveis. Trata-se de um gráfico onde são representados os pares (X_i, Y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, onde n = número total de observações (Lira, 2004).

A Figura 17 (a – d) apresenta exemplos de diagramas de dispersão mostrando os tipos de correlações entre duas variáveis.

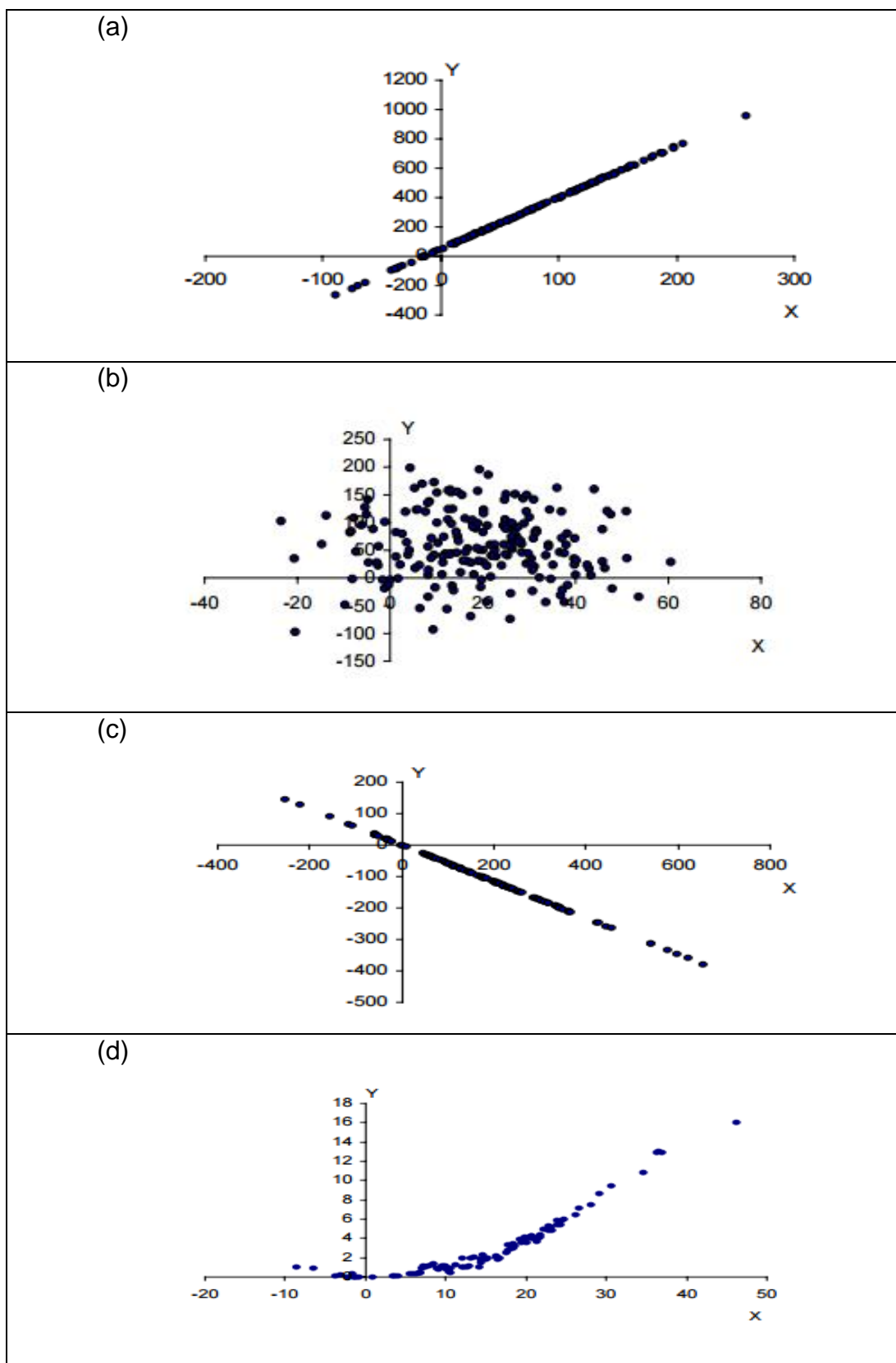


Figura 17. Gráficos de dispersões: a) correlação linear positiva perfeita entre as variáveis X e Y; b) correlação linear nula entre as variáveis X e Y; c) correlação linear negativa perfeita entre as variáveis X e Y; d) correlação não linear entre as variáveis X e Y. Fonte: modificado de Lira, 2004.

Na análise bivariada enfatizou-se a construção de gráficos de concentração de ferro versus outros parâmetros físico-químicos para avaliar cada par de variáveis. Desta forma, foram construídos 15 diagramas de dispersão com o objetivo de analisar o relacionamento entre o ferro e os parâmetros físico-químicos da água subterrânea investigada: cor aparente, turbidez, pH, condutividade elétrica, dureza total, sólidos totais dissolvidos, cloreto, alcalinidade de carbonatos, alcalinidade de bicarbonatos, cálcio, fluoreto, magnésio, nitrito, nitrato, sílica e sulfato.

De acordo com LIRA (2004), quando a análise envolve um grande número de variáveis e há interesse em conhecer a correlação entre os pares de variáveis, é comum à construção de uma matriz de correlação. Esta matriz é formada pelas correlações entre as variáveis X_i e X_j , $i \neq j$, fora da diagonal e 1 na diagonal, indicando a correlação das variáveis X_i e X_j , sendo $i = j$.

A Matriz de Correlação Linear de Pearson é utilizada frequentemente em dados paramétricos onde às condições de Gaussianidade, homocedasticidade e independência do modelo são razoavelmente atendidas. Para um número muito grande de elementos na amostra, as diversas distribuições de probabilidades se aproximam da distribuição de Gauss. Satisfeitas estas condições os resultados obtidos são mais consistentes. Em situações de correlação não paramétrica, onde se supõe não haver nenhuma distribuição particular de frequência das variáveis, recomendam-se o uso da Matriz de Correlação Spearman. Ao contrário do coeficiente de correlação de Pearson, a Matriz de Correlação Spearman não requer que a relação entre as variáveis seja linear, nem que as variáveis sejam medidas em intervalos de classes.

Neste trabalho foram aplicados os dois métodos – Pearson e Spearman – na tentativa de buscar a melhor correlação entre o ferro e os parâmetros físico-químicos supracitados.

4.5.3 *Análise de correlação multivariada – SPSS e PCA*

Uma análise simultânea das diversas variáveis foi possível utilizando os softwares aplicativos de análise estatística *Statistical Package for the Social*

Sciences (SPSS), com o uso da técnica de Análise de Regressão, e o software Statistical Analysis, com a técnica de Análise de Componentes Principais (PCA). Estes softwares fornecem ferramentas que permitem executar procedimentos para explicar as relações entre variáveis.

O SPSS foi usado para cálculo dos coeficientes de fatores aplicados aos parâmetros escolhidos neste trabalho para investigação da provável correlação com o ferro: litologia, clima, vegetação e solo. Nele aplicou-se a regressão linear, sendo o ferro a variável dependente e os fatores naturais, introduzidos aqui através de notas de importância ou notas dos fatores influentes, as variáveis independentes.

A análise PCA é um procedimento matemático que permite identificar padrões nos dados e expressá-los de uma maneira tal que suas semelhanças e diferenças sejam destacadas. Essa técnica foi executada também nas 940 amostras de águas subterrâneas, com a finalidade de comparar seus resultados aos encontrados no método SPSS.

4.6 Escolha das notas para valoração dos atributos

O procedimento utilizado na definição das notas dos fatores influentes na concentração de ferro das águas subterrâneas resulta de informações da revisão da literatura, de discussões envolvendo professores do IGEO/UFBA que trabalham na área de hidroquímica e de consultas feitas a especialista da CERB. Contribuíram também para o cumprimento dessa etapa a aplicação de técnicas utilizadas na estatística, bem como a formação profissional do autor e sua experiência no campo da hidrogeologia.

Para avaliar a influência da litologia, do solo, do clima e da vegetação nas concentrações de ferro da água subterrânea do Estado da Bahia, foram selecionadas as 940 amostras de água com altos teores de ferro, sendo estabelecido um critério de notas de 1 a 5 para as variáveis, onde o menor valor atribuído à variável corresponde à menor influência da variável na concentração de ferro.

Os dados foram distribuídos segundo uma avaliação preliminar de importância por parâmetro independente para obter a distribuição dos teores de ferro em função de cada parâmetro. Foi então realizada uma revisão dos dados, seguida de nova rodada de discussão, com o objetivo de aprimorar as notas estabelecidas para a litologia, clima, vegetação e solo. Os gráficos revelaram a distribuição dos teores, sendo imprescindíveis para o ajuste e determinação das notas. Definidas as notas mais adequadas, estas foram utilizadas nos métodos analíticos de análise multivariada, SPSS e PCA, com o objetivo de verificar o grau de correlação entre o ferro e esses fatores naturais.

4.6.1 Litologia

Na revisão de literatura ficou evidenciado que o ferro está associado a minerais máficos e que dentre as unidades litológicas portadoras desse elemento no Estado da Bahia estão os corpos máfico-ultramáficos, os greenstone belts e os granulitos heterogêneos orto e paraderivados. Estas unidades litológicas ou unidades geotectônicas, fontes primárias de ferro, pertencem ao domínio das rochas cristalinas. Outras unidades enriquecidas em ferro no território baiano são as metavulcanossedimentares e as rochas do Grupo Serra de Jacobina, que compõem o domínio das rochas metassedimentares.

Partindo desse pressuposto, assumiu-se que esses dois domínios hidrogeológicos apresentavam as maiores probabilidades de possuírem água subterrânea com os mais altos teores de ferro do Estado. Por isto, atribuíram-se a eles as maiores notas.

Para subsidiar a tomada de decisão referente às notas que foram aplicadas em todos os domínios hidrogeológicos, utilizou-se a análise de correlação bivariada, com a construção de gráficos de dispersão para verificar o comportamento do ferro em função da litologia. Os dados de teores de ferro foram dispostos na ordenada do plano cartesiano, fazendo variar na abscissa as litologias representadas pelos domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia. Tal procedimento foi fundamental para a definição das notas dos domínios

hidrogeológicos, que neste caso confirmaram as tendências preconizadas na revisão de literatura. As notas atribuídas aos domínios hidrogeológicos constam no capítulo 5.

4.6.2 *Clima*

Para definir as notas dos diversos tipos de clima foi utilizado o mapa de clima do Estado da Bahia (Figura 9) em escala ao milionésimo. Em função do caráter regional da pesquisa, a base cartográfica utilizada não apresentou riqueza de detalhes, de forma que as faixas de transições de climas não foram seguramente definidas no mapa. Os poços localizados nestas faixas podem eventualmente estarem agrupados num determinado tipo de clima que não corresponda com a realidade local.

A aplicação do diagrama de dispersão foi fundamental na visualização da distribuição dos teores de ferro nos diversos climas do Estado da Bahia e daí poder melhor arbitrar as notas para os climas. Estas notas estão apontadas no capítulo 5.

4.6.3 *Vegetação*

Para estabelecer as notas da vegetação utilizou-se como base cartográfica o mapa de ecoregiões do Estado da Bahia (Figura 15), também em escala ao milionésimo.

Semelhantes dificuldades foram encontradas para enquadrar os poços perfurados nos diferentes tipos de vegetações ocorrentes no território Baiano devido à natureza regional da pesquisa. Assim como no clima, algumas notas aplicadas à vegetação podem não corresponder à realidade local, vindo a comprometer, de certa forma, a qualidade dos resultados.

Foi construído similarmente o gráfico de dispersão para verificar o comportamento da distribuição dos teores de ferro em função das diversas vegetações, sendo possível, dessa forma, fixar as notas. O capítulo 5 mostra as notas estabelecidas para as ecoregiões do Estado: cerrado, caatinga, florestas

secas do Nordeste, Chapada Diamantina e florestas costeiras-florestas do interior da Bahia.

4.6.4 Solo

O mapa de solos do Estado da Bahia (Figura 14) foi à base cartográfica utilizada para agrupar os tipos de solos por importância de ocorrência no Estado e a partir daí, poder mensurar as notas de influência na concentração de ferro das águas subterrâneas. Em função da variabilidade e complexidade dos solos, foi necessária uma análise mais criteriosa.

Do mesmo modo que a litologia, o clima e a vegetação, recorreram-se à estatística como ferramenta de apoio para confirmar ou negar a ordem das notas inicialmente sugeridas. Para esse fim, foi construído também o gráfico de dispersão que se mostrou fundamental no ajuste das notas preliminarmente ajuizadas.

Dos diversos solos existentes no território baiano, seis deles foram selecionados neste trabalho em função de suas áreas de ocorrências no Estado. São eles: latossolos/argissolos (57,57%), neossolos (22,96%), planossolos (7,98%), cambissolos (6,89%) e luvisolos/chernossolos (2,20%). As notas estão exibidas no capítulo 5.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Distribuição dos teores de ferro da água subterrânea do Estado da Bahia

A Tabela 4 apresenta os percentuais de poços perfurados pela CERB, de 2003-2013, nos diferentes tipos de domínios hidrogeológicos do território baiano, bem como as 940 amostras com alto teor de ferro.

Tabela 4. Poços perfurados pela CERB de 2003 a 2013, por domínio hidrogeológico e por teor de ferro

Domínio hidrogeológico	Número de poços e %	Poços com Fe>0,3mg/L e %	%de poços com Fe>0,3mg/L
Calcário	660 (18,65)	93 (9,89)	14,10
Cristalino	1688 (47,70)	468 (49,79)	27,70
Metassedimentar	697 (19,69)	227 (24,15)	32,60
Sedimentar	494 (13,96)	152 (16,17)	30,80
TOTAL	3.539 (100,00)	940(100,00)	-

Fonte: O Autor

A análise dos dados revelou que de um contingente de 3.539 amostras de águas subterrâneas captadas de poços perfurados pela CERB no período de 2003-2013, 940 amostras de água apresentaram teores de ferro acima de 0,3 mg/L, correspondendo a 26,56% do total de poços tubulares analisados. Esses números são bastante expressivos do ponto de vista econômico e social, tanto quanto pela perda de poços que não serão explorados, como pela ocorrência de poços que para serem explorados exige que se proceda ao tratamento para a remoção do ferro.

Tomando-se a razão entre o número de poços com Fe>0,30 mg/L (fora do padrão de potabilidade pela Resolução MS 2914/2011) e a quantidade de poços perfurados em cada domínio hidrogeológico, vê-se que o percentual de poços com ferro elevado no domínio calcário é de (14,10%) enquanto nos domínios cristalino, metassedimentar e sedimentar estão na faixa de (27,70 – 32,60%).

A Figura 18 apresenta a distribuição percentual de poços com concentração de ferro $>0,30$ mg/L por domínio hidrogeológico, no universo de 940 poços que apresentam ferro alto.

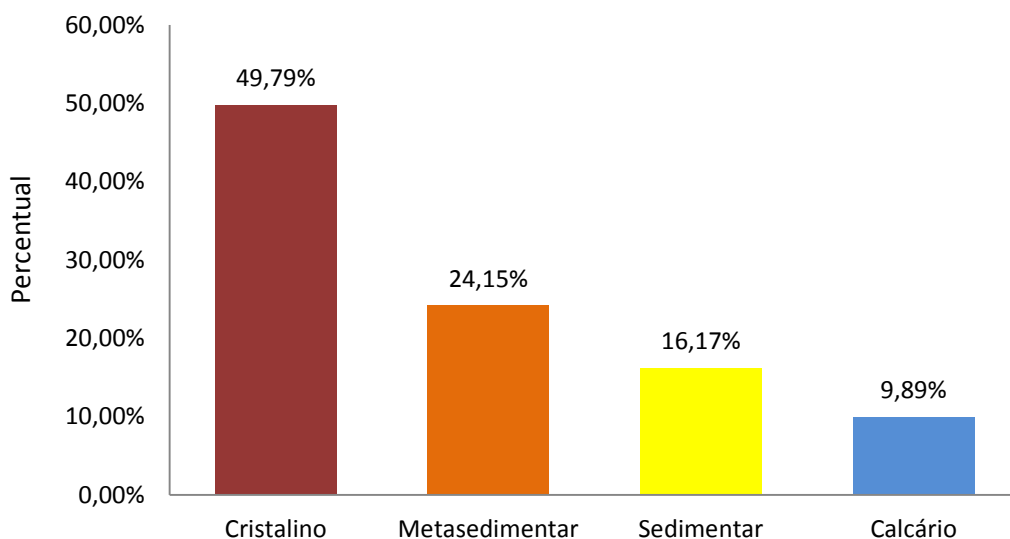


Figura 18. Distribuição de ferro no universo de 940 amostras com teor $>0,3$ mg/L e vazão $\geq 1,0$ m³/h, por domínio hidrogeológico. Fonte: O Autor.

De todas as amostras de água subterrânea investigadas contendo teores elevados de ferro, verifica-se que aproximadamente metade (49,79%) está enquadrada no domínio das rochas cristalinas e este percentual é comparável com o percentual de 47,70% de poços perfurados no cristalino, seguida pelo domínio das rochas metassedimentares (24,15%). Os domínios das rochas calcárias e das rochas sedimentares foram os que apresentaram as menores quantidades de poços com ferro $>0,3$ mg/L, com 9,89% e 16,17%, respectivamente.

Comparando-se esses percentuais com cada percentual de poços com alto teor de ferro ($>0,3$ mg/L) calculado com relação ao número total de poços perfurados em cada domínio hidrogeológico, constata-se que o domínio dos calcários é o único que se mantém na mesma posição percentual, ou seja, apresenta o menor percentual tanto quando calculado para o número total de poços com ferro alto como para o número de poços perfurados para qualquer teor de ferro. Os percentuais de (9,89 e 14,10) indicam que este domínio

hidrogeológico é o menor produtor de poços com concentrações elevadas de ferro. Em seguida, destaca-se o cristalino, que apresenta o maior percentual dos poços com ferro alto calculado com referência ao percentual dos poços com ferro elevado, mas, apresenta um percentual de 27,70% com relação ao total de poços perfurados no domínio. Este percentual é similar aos domínios do metassedimentar e sedimentar, que tem comportamento semelhante. O primeiro tem percentuais de (24,15 e 32,60) e o segundo de (16,17 e 30,80) com relação, respectivamente, ao percentual de poços com alto teor de ferro e à totalidade dos poços perfurados em cada domínio hidrogeológico. Assim sendo, os domínios cristalino, metassedimentar e sedimentar são os maiores contribuidores com poços contendo elevados teores de ferro, na faixa de um terço dos poços perfurados em cada domínio (27,70 a 32,60%).

Na Figura 19 é apresentado o mapa de localização dos 3.539 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, por município do Estado da Bahia; enquanto na Figura 20 é mostrado o mapa de contorno dos teores de ferro das águas subterrâneas do Estado.

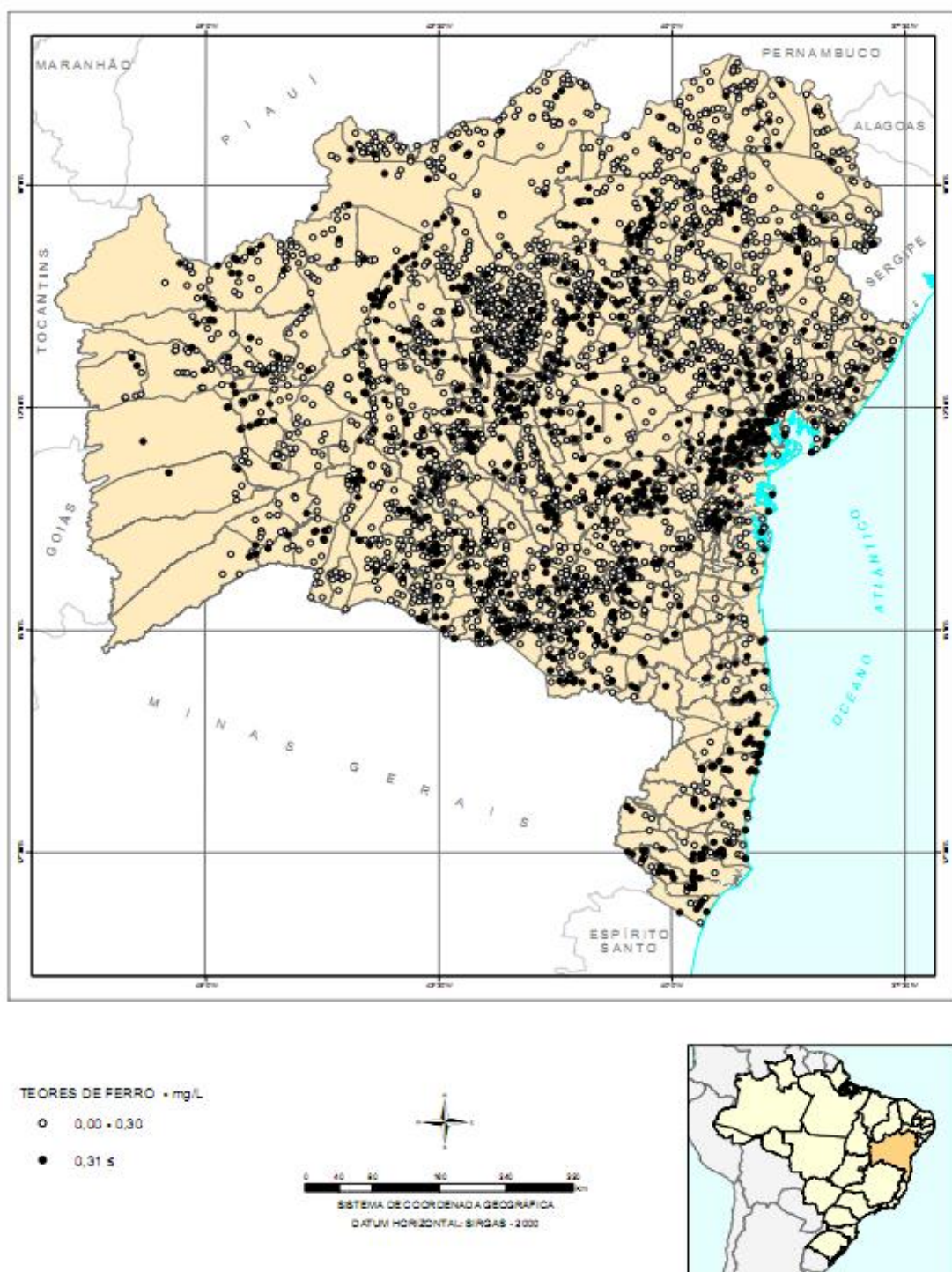


Figura 19. Mapa de localização dos 3.539 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/Le vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, por município do Estado da Bahia. Fonte: O Autor.

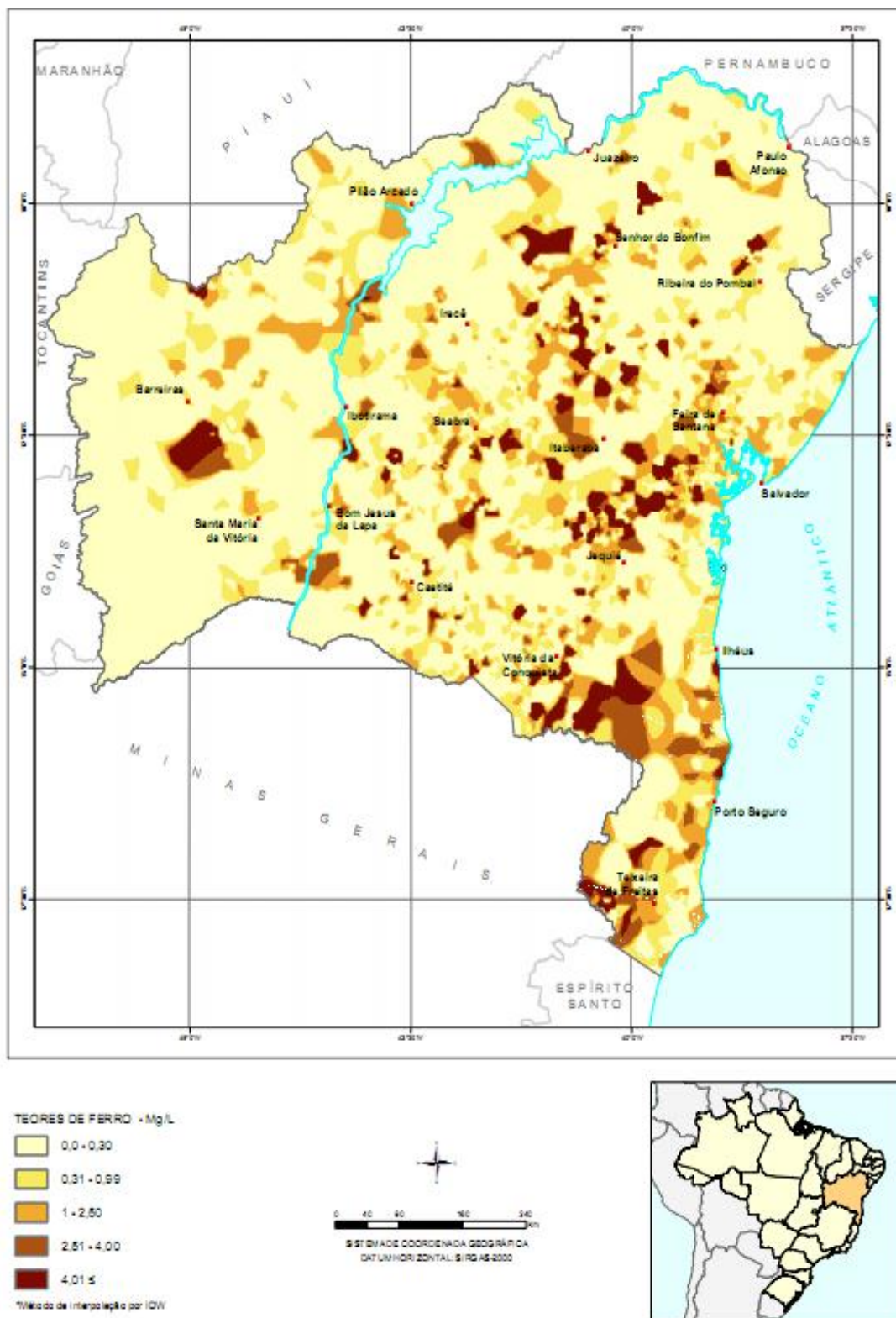


Figura 20. Mapa de contorno de teores de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia. Fonte: O Autor.

De acordo com os mapas das Figuras 19 e 20, existem altos teores de ferro nas águas subterrâneas de todos os domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia.

Para examinar mais detalhadamente a distribuição dos teores de ferro nas águas subterrâneas do Estado, foram construídos mapas de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, nos quatro domínios hidrogeológicos, separadamente.

5.1.1 Domínio das rochas cristalinas

O domínio das rochas cristalinas compreende aproximadamente 40% do território baiano. Devido à enorme extensão de área que compõe este domínio, ele foi subdividido em três compartimentos para a melhor visualização da distribuição dos teores de ferro: Cristalino Centro-Norte, Cristalino Centro-Sul e Cristalino Sudoeste.

A análise de cada compartimento foi feita a partir da individualização de faixas que foram identificadas com base na disposição espacial de densidade dos poços tubulares (aglomerados e dispersos) que apresentaram ferro em excesso em suas águas. Para delimitar essas faixas, tomou-se como referência o fator climático e a partir daí buscou-se estabelecer relação com a geologia.

O mapa da Figura 21 apresenta a localização dos 1.688 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, no domínio das rochas cristalinas. Já o mapa da Figura 22 apresenta a localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, distribuídos por tipos de climas, no compartimento Cristalino Centro-Norte.

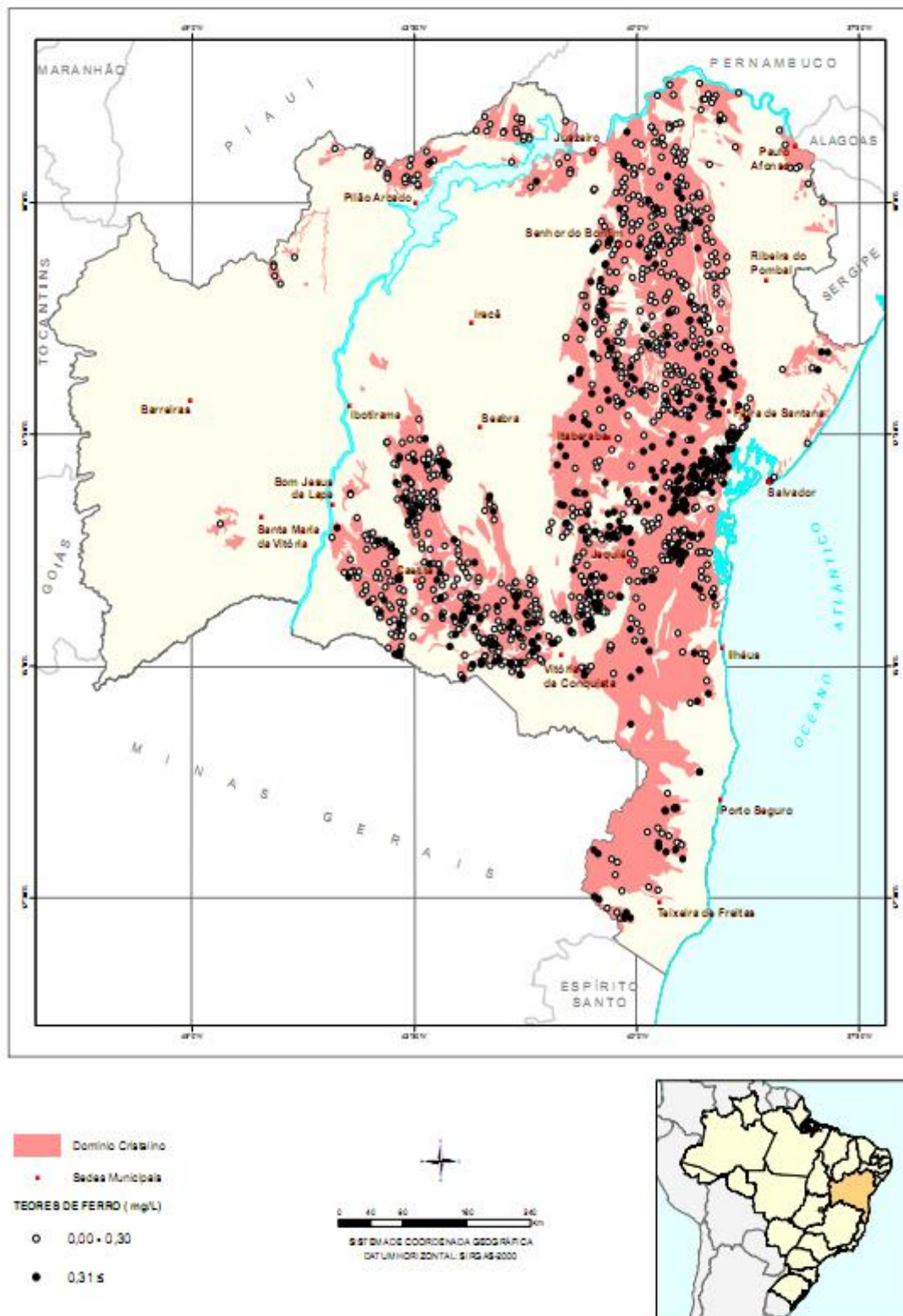


Figura 21. Mapa de localização dos 1.688 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m³/h, no domínio hidrogeológico das rochas cristalinas. Fonte: O Autor.

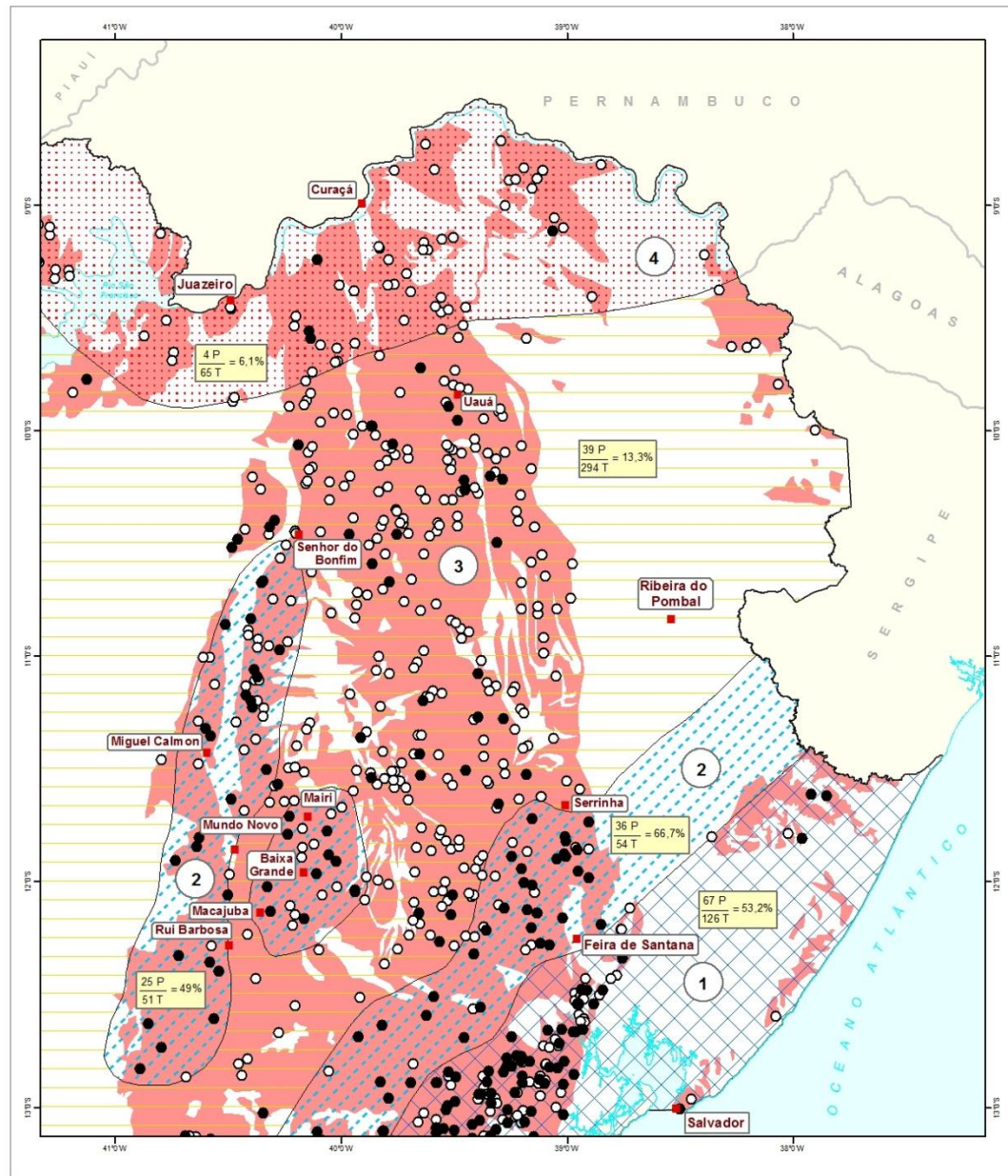


Figura 22. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L, por tipo de clima, no compartimento Cristalino Centro-Norte. Fonte: O Autor.

O mapa da Figura 22 mostra a existência de quatro tipos de clima no compartimento Cristalino Centro-Norte, distribuídos de Sul para Norte da seguinte forma: úmido e úmido a subúmido; subúmido a seco; semiárido; e, árido. Assim sendo, o compartimento foi subdividido em quatro faixas para análise.

A faixa 1 corresponde a área situada na parte mais a sul do compartimento. Ela está submetida aos climas úmido e úmido a subúmido e tem como cobertura vegetal a mata atlântica. Observa-se nessa faixa um forte contingente de poços tubulares perfurados contendo teores elevados de ferro na água (53,2%).

A faixa 2 é uma área contígua à primeira e tem como principais características o clima subúmido a seco e vegetação de florestas secas do Nordeste. Fazem parte também dessa faixa, duas outras áreas: uma no centro e outra a leste do compartimento, as quais compartilham as mesmas características climáticas. A área mais a centro estende-se do município de Várzea do Poço ao município de Macajuba e a área mais a leste vai desde o município de Antônio Gonçalves até o município de Boa Vista do Tupim. Na área contígua à faixa 1 constata-se uma forte densidade de poços perfurados com ferro alto (66,7%) e nas áreas central e mais a leste do compartimento a tendência de alta aglomeração de poços com ferro alto se mantém (49%).

A faixa 3 corresponde a maior área do compartimento Cristalino Centro-Norte. Caracteriza-se por apresentar clima semiárido e vegetação de caatinga. Embora tenha sido perfurado nesta área uma grande quantidade de poços tubulares no período estudado (294 poços), poucos deles apresentaram água com altos teores de ferro (13,3%).

A faixa 4 localiza-se na parte do extremo norte do compartimento, sob o clima árido, o mais severo do Estado. A vegetação característica desta faixa é a caatinga. Foram perfurados 65 poços tubulares nessa área, e apenas 4 poços apresentaram altos teores de ferro na água (6,1%).

Com base nestas constatações foi possível estabelecer uma relação entre a densidade de poços com altos teores de ferro na água subterrânea da Bahia e os tipos de clima (Tabela 5).

Tabela 5. Relação entre as condições climáticas e a distribuição de poços com Fe>0,3 mg/L no compartimento Cristalino Centro-Norte

Faixa	Clima	Densidade de poços	Percentual
1	Úmido e úmido a subúmido	Forte	53,2
2	Subúmido a seco	Forte	66,7 e 49
3	Semiárido	Fraca	13,3
4	Árido	Muito fraca	6,1

Fonte: O Autor.

A Tabela 6 apresenta a geologia predominante do compartimento Cristalino Centro-Norte, por faixas climáticas.

Tabela 6. Distribuição das unidades litológicas por faixas climáticas, no compartimento Cristalino Centro-Norte

Faixa	Clima	Unidade litológica predominante
1	Úmido e úmido a subúmido	Granulitos.
2	Subúmido a seco	Granulitos, gnaisses, migmatitos, anfibolitos, corpos máfico-ultramáficos greenstone belts e suíte máfica.
3	Semiárido	Granulitos, gnaisses, migmatitos, anfibolitos, corpos máfico-ultramáficos greenstone belts e diques máficos.
4	Árido	Gnaisses, migmatíticos, anfibolitos, corpos máfico-ultramáficos e greenstone belt.

Fonte: O Autor.

Os dados da Tabela 6 indicam que em escala regional o compartimento Cristalino Centro-Norte não apresenta grandes variações litológicas, podendo a rocha neste caso ser considerada como uma unidade de igual importância nas quatro faixas climáticas. O clima, por sua vez, apresenta grandes variações no espaço (variando de úmido a árido), levando a estabelecer uma relação de influência com os teores de ferro encontrados nas águas subterrâneas. Percebe-

se no mapa uma diminuição no número de poços com alto teor de ferro no sentido de menor pluviometria (clima árido).

O mapa da Figura 23 exibe a localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, distribuídos por tipo de clima, no compartimento Cristalino Centro-Sul.

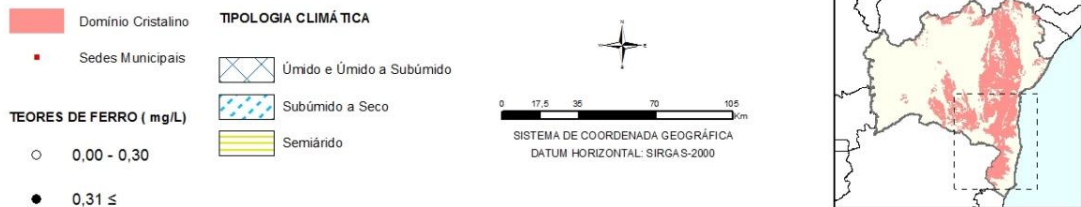
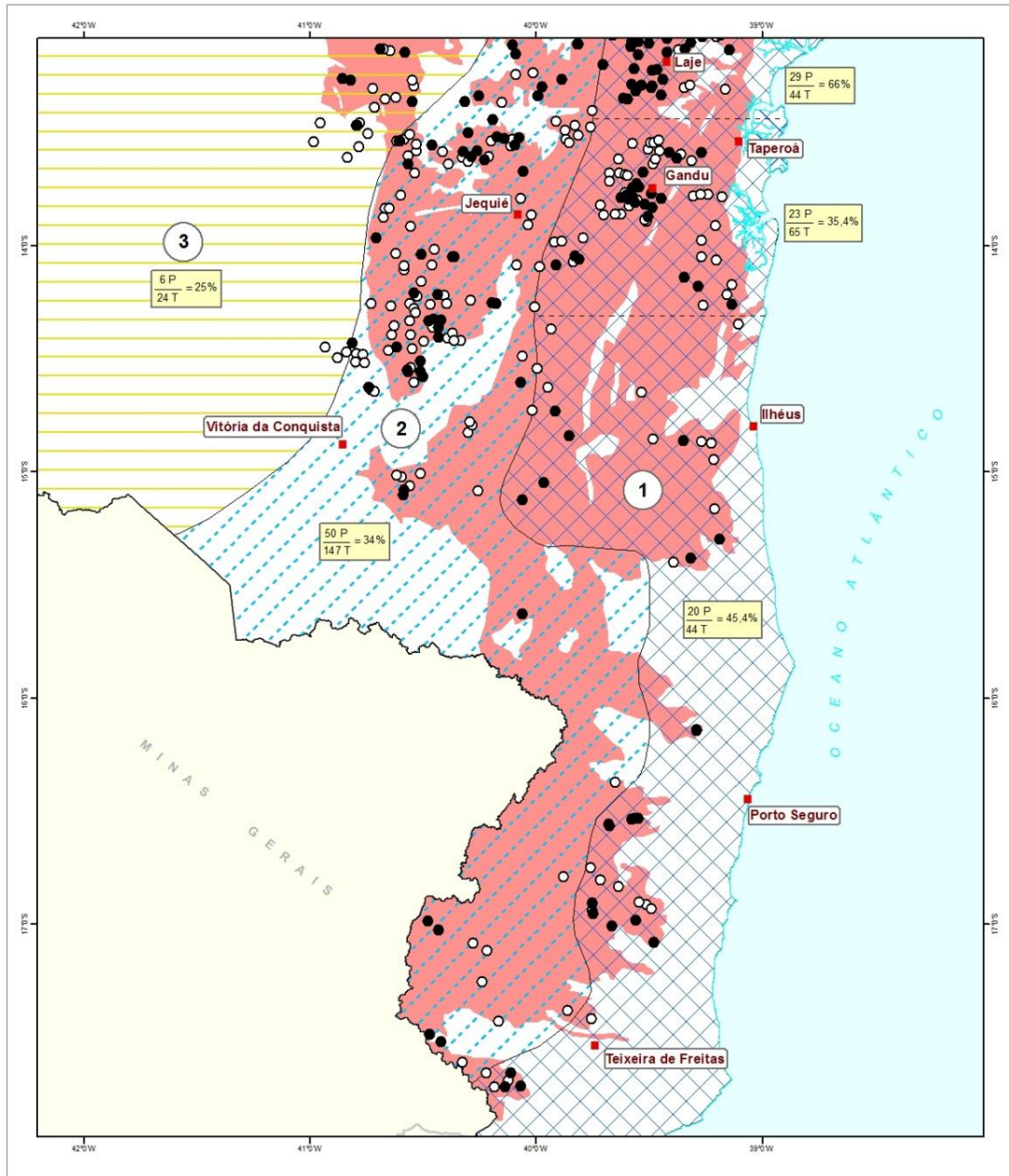


Figura 23. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L, por tipo de clima, no comprimento Cristalino Centro-Sul. Fonte: O Autor.

Nesse compartimento ocorrem três tipos de climas: úmido e úmido a subúmido; subúmido a seco; e, semiárido.

A faixa 1 (leste) é um prolongamento da faixa 1 do compartimento Cristalino Centro-Norte. À vista disto, apresenta características análogas: clima úmido e úmido a subúmido, vegetação de mata atlântica e granulitos predominantemente como rocha matriz.

Duas áreas de maior concentração de poços com ferro em excesso se destacam nessa faixa: a primeira com 66% de poços com ferro alto compreende os municípios de Aratuípe, Lajes, Mutuípe e Jequiçá e a segunda com 35,4% abrange os municípios de Taperoá, Teolândia, Gandu, Piraí do Norte, Itamarí e Nova Ibiá.

Na área que se estende da parte mediana até o extremo sul do compartimento, de mesmas condições de clima e de rocha, os poços com altas concentrações de ferro apresentam-se mais dispersos; o que pode ser ocasionado pela menor quantidade de perfurações pela CERB. Entretanto, 45,4% destes poços possuem ferro alto. Esta região apresenta excesso hídrico, fruto dos grandes volumes de chuvas que ocorrem anualmente, o que reforça a importância do clima na evolução dos teores de ferro nas águas subterrâneas do Estado da Bahia.

A faixa 2, situada no centro, é também uma continuidade da faixa 2 do compartimento anterior. Apresenta clima subúmido a seco, vegetação de florestas do interior da Bahia, granulitos como rochas predominantes e um número significativo de poços perfurados contendo elevados teores de ferro (34%).

A faixa 3 é uma estreita área localizada no lado oeste do compartimento, de clima semiárido, vegetação de caatinga e granulitos no substrato. 6 poços foram identificados nesta faixa contendo ferro em excesso de um total de 24 poços perfurados, ou 25%.

O mapa da Figura 24 corresponde à localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1 \text{ m}^3/\text{h}$, distribuídos por tipo de clima, no compartimento Cristalino Sudoeste.

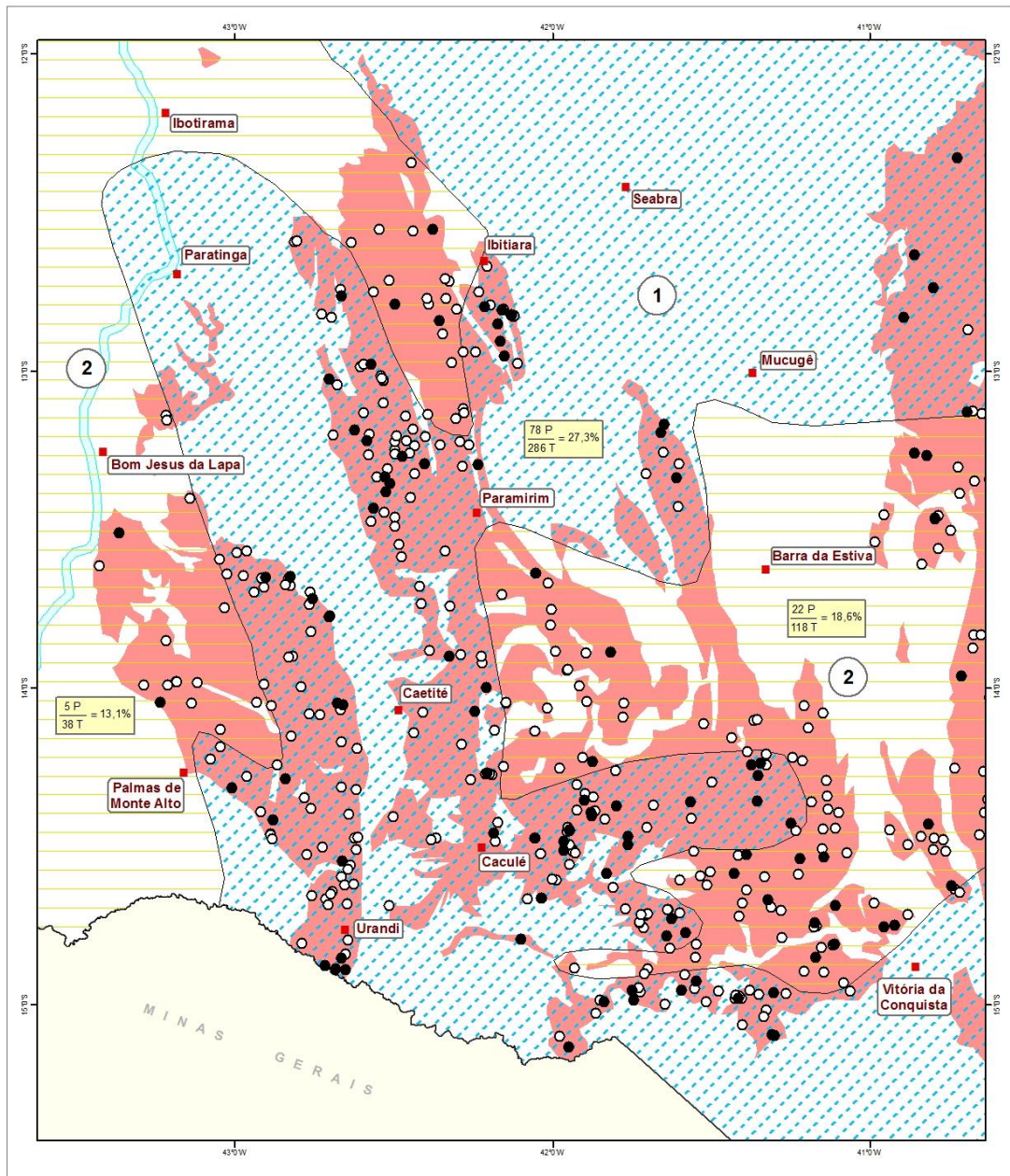


Figura 24. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L, por tipo de clima, no comprimento Cristalino Sudoeste. Fonte: O Autor.

Nesse compartimento ocorrem dois tipos de climas: subúmido a seco e semiárido, sendo, portanto, o compartimento subdividido em duas faixas. O mapa mostra que onde ocorre o clima subúmido a seco (faixa 1-centro do compartimento), existem 78 poços contendo ferro em excesso, para um total de 286 poços, ou 27,3%. Nas faixas de clima semiárido os percentuais de poços com ferro alto reduz para 18,6 e 13,1%. Os poços ricos em ferro nesse compartimento estão localizados nas unidades litológicas de caráter básico, ou próximos delas, conforme demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7. Municípios com maiores densidades de poços com $Fe > 0,3$ mg/L por unidade litológica no compartimento Cristalino Sudoeste

Municípios	Unidades Litológicas
Novo Horizonte	Sequência metavulcânica Ibiajara
Macaúbas-Botuporã	Greenstone belt Boquira
Riacho de Santana-Igaporã	Greenstone belt Riacho de Santana
Caetité-Guanambi-Candiba-Pindaí-Urandi	Complexo Santa Isabel
Lagoa Real-Ibiassuçê-Caculé	Greenstone belt Ibitira-Ubiraçaba
Brumado-Malhada de Pedras-Guajeru- Presidente Jânio Quadros	Greenstone belt Brumado e greenstone belt Guajeru

Fonte: O Autor.

Conforme exposto, em todos os compartimentos do domínio hidrogeológico das rochas cristalinas, as maiores densidades de poços contendo alto teor de ferro ocorrem nas faixas de climas úmido e úmido a subúmido e subúmido a seco. Essa tendência se modifica à medida que vai diminuindo o volume de chuvas na região: fraca densidade em clima semiárido e muito fraca, em região de clima árido.

Por outro lado, fica também evidenciado que a existência de unidades litológicas potencialmente ricas em ferro em regiões de climas semiárido e árido não compromete a qualidade química da água subterrânea, no quesito ferro. Isto se deve, provavelmente, à fraca atuação do intemperismo químico sobre a rocha matriz para formar o manto de decomposição (regolito), devido ao baixo volume

de chuvas, e, conseqüentemente a existência de escassez hídrica nessas regiões.

A Tabela 8 refere-se à distribuição das entradas de água (E.A), em percentual, por faixa de profundidade, no domínio das rochas cristalinas.

Tabela 8. Percentual de ocorrência das entradas de água por faixa de profundidade

Faixa de profundidade de E.A (m)	Percentual de ocorrência (%)
0 - 25	30,49
25 - 50	39,30
50 - 75	20,04
>75	10,17

Fonte: O Autor.

A Tabela mostra que quase 70% das entradas de água que compõem o aquífero fraturado do domínio das rochas cristalinas se concentram até a profundidade de 50 metros, sendo que 30,49% delas ocorrem entre o manto decomposto e a profundidade de 25 metros.

A ocorrência de fraturamentos próximos à superfície do terreno pode contribuir para a hidroquímica da água subterrânea. Através desses fraturamentos circulam as águas pluviométricas que adentram o solo, percolam o manto decomposto e levam para o aquífero os elementos químicos residualmente enriquecidos no regolito.

Para exemplificar a importância dos fraturamentos nos teores de ferro nesse domínio hidrogeológico, foram selecionados 136 poços com os mais altos teores de ferro encontrados na água: 2,00 a 33,30 mg/L. Os resultados mostram que destes apenas 15 poços, ou seja; 11% tiveram entradas de água na profundidade superior a 50 metros, significando que 89% dos poços restantes apresentam fraturamentos mais superficiais (0 a 50 m).

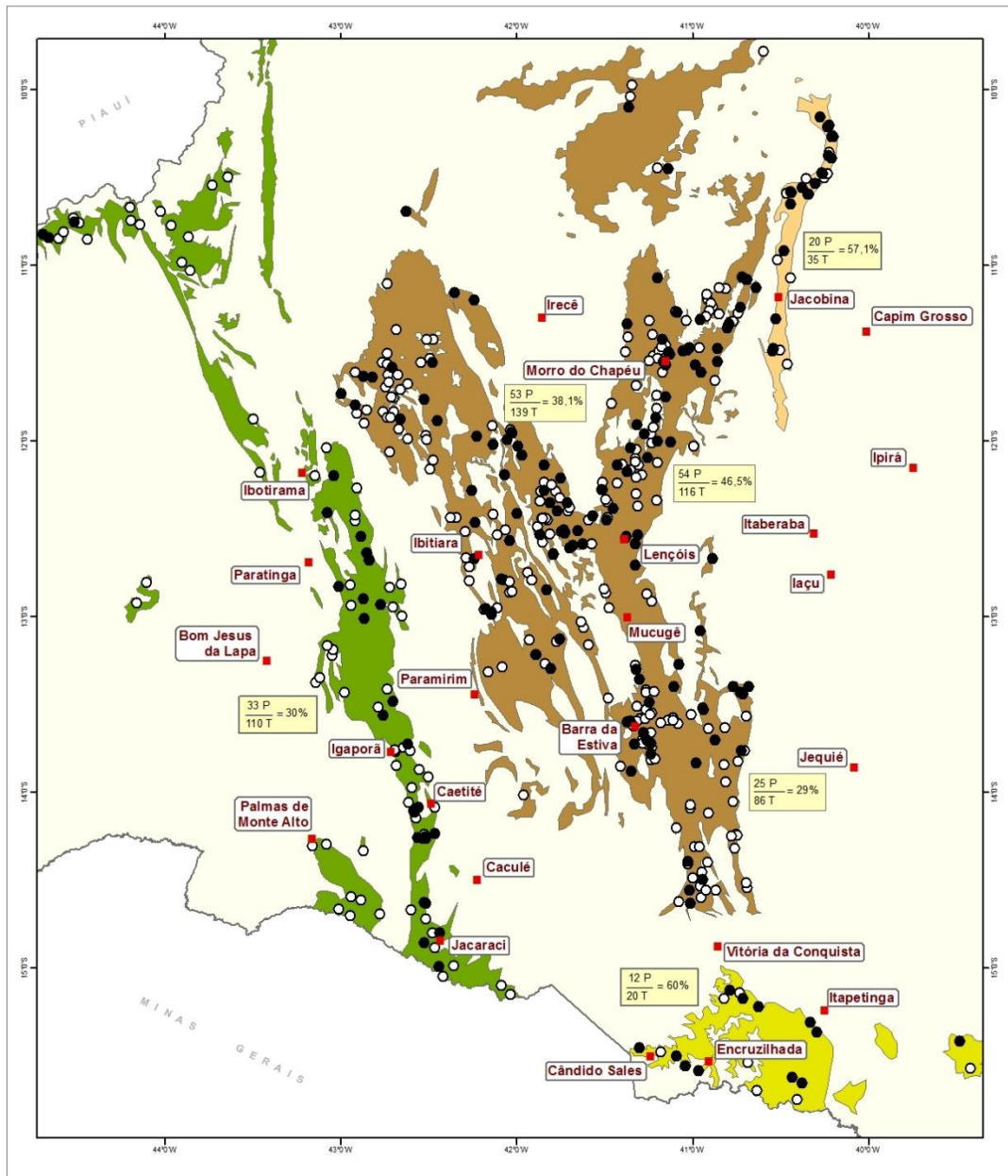
Todavia, convém ressaltar que a água coletada de poço tubular é resultante do somatório das águas que percolam por todos os fraturamentos identificados durante os serviços de perfuração. Não sendo possível, portanto, dado ao caráter regional desta pesquisa, estabelecer tecnicamente uma relação de evolução dos teores de ferro da água subterrânea com as profundidades de entradas de água do poço.

5.1.2 *Domínio das rochas metassedimentares*

Com a quantidade de 227 amostras, este domínio representa 24,15% de todas as amostras com elevados teores de ferro presente na água, se posicionando dessa forma como o segundo domínio hidrogeológico com maior quantidade de poços contendo ferro $>0,3\text{mg/L}$ na água.

Os poços tubulares com altas concentrações de ferro estão localizados nas diversas unidades litológicas que compõem as rochas metassedimentares do Espinhaço Setentrional, da Chapada Diamantina e da Serra de Jacobina. Todas situadas sob o mesmo clima: subúmido a seco. Isso permitiu avaliar a influência da variação litológica em função de um único clima, diferente da análise anterior.

O mapa da Figura 25 corresponde ao domínio das rochas metassedimentares. Ele apresenta a localização dos 697 poços perfurados pela CERB entre 2003-2013, com teores de ferro abaixo e acima de $0,3\text{ mg/L}$ e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$.



DOMÍNIO META SSEDIMENTAR

- Chapada Diamantina
- Faixa Araçuaí
- Metassedimentos do Espinhaço
- Serra de Jacobina

TEORES DE FERRO (mg/L)

- 0,00 - 0,30
- 0,31 \leq



Figura 25. Mapa de localização dos 697 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3mg/L e vazão $\geq 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, no domínio hidrogeológico das rochas metassedimentares. Fonte: O Autor.

Na faixa oeste do compartimento (verde) encontra-se o Espinhaço Setentrional. Neste grupo de rochas os elevados teores de ferro das águas subterrâneas (30%) estão relacionados aos itabiritos da Formação Algodão, às rochas básicas e formações ferríferas do Grupo Oliveira dos Brejinhos, às formações ferro-manganesíferas pertencentes ao Grupo São Marcos, aos metarenitos ferruginosos do Grupo Santo Onofre e aos enxames de diques e soleiras máficos, quase sempre controlados por falhamentos, intrusivos nos Grupos Oliveira dos Brejinhos, São Marcos e Santo Onofre. As principais concentrações de ferro nesse compartimento se estendem desde o município de Oliveira dos Brejinhos a norte, até o município de Mortugaba a sul, passando pelos municípios de Boquira, Paratinga, Macaúbas, Riacho de Santana, Igaporã, Caetité, Licínio de Almeida e Jacaraci.

Na Chapada Diamantina (marrom), as elevadas concentrações de ferro na água subterrânea (38,1 e 29%) estão associadas aos basaltos, itabiritos e metarenitos ferruginosos do Grupo Rio dos Remédios (parte oeste). Essa associação de litofácies se estende desde o município de Ipupiara até o município de Rio de Contas e no entorno de Barra da Estiva.

Na parte central da Chapada Diamantina o ferro pode está aliado a corpos intrusivos máficos (diques básicos) que cortam as unidades do Grupo Chapada Diamantina (Formações Tombador e Caboclo). Nessa área da Chapada que compreende os municípios de Várzea Nova, Morro do Chapéu e Bonito, constata-se que a maior quantidade de poços com ferro alto está relacionada aos metassedimentos da Formação Caboclo. Isso se deve, muito provavelmente, ao tipo de aquífero poro-fissural presente nessa formação. A excelente mobilidade do íon ferro nas condições de pH da água subterrânea (6,0 a 9,5) permite que ele atinja extensas áreas do aquífero, em função do movimento das águas nos poros e nas fraturas dessas rochas.

Ainda no centro da Chapada Diamantina, principalmente nas áreas pertencentes aos municípios de Lençóis, Palmeiras, Boninal e Seabra, ocorrem elevadas concentrações de ferro associadas aos sedimentos mais friáveis do Grupo Paraguaçu, que também apresentam similar tipo de aquífero da

Formação Caboclo. A parte central da Chapada Diamantina contribui com 46,5% dos poços com altos teores de ferro.

No extremo sul do mapa (amarelo), região que abrange os municípios de Cordeiros, Piripá, Cândido Sales, Encruzilhada, Itambé, Itapetinga e Macarani, 60% dos poços tubulares analisados expressam elevadas concentrações de ferro. O ferro aí presente pode estar vinculado a uma extensa faixa de xistos micáceos, intercalados de rochas calcossilicáticas, metarenitos e xistos grafitosos que compõem a Faixa Araçuaí; não mais pertencentes aos metassedimentos dos Grupos Espinhaço e Chapada Diamantina.

Na parte nordeste do mapa (creme) encontra-se a Serra de Jacobina. Nela se observa também uma grande densidade de poços perfurados contendo teores elevados de ferro (57,1%). É muito provável que o ferro fortemente presente nesta área seja proveniente dos corpos máfico-ultramáficos encaixados nos quartzitos, como resultado de preenchimento de grandes falhamentos que afetaram a região.

Os corpos máfico-ultramáficos são rochas menos resistentes ao intemperismo químico, impondo ao relevo o formato de vales, enquanto as encostas, bastante íngremes, são representadas pelos quartzitos coesos. Essa feição geomorfológica imposta pelo contraste topográfico, resultante das diferentes resistências das rochas é normalmente utilizada como critério de locação de poços nesta região. De modo geral, os poços são locados e perfurados nos vales, no contato dos quartzitos com as rochas máfica-ultramáficas. Isso tem contribuído para uma grande quantidade de poços com altos teores de ferro, no Grupo Jacobina (57,1%).

A Tabela 9 refere-se às entradas de água (E.A), em percentual, por faixa de profundidade, no domínio das rochas metassedimentares.

Tabela 9. Percentual de ocorrência das entradas de água por faixa de profundidade

Faixa de profundidade de E.A (m)	Percentual de ocorrência (%)
0 - 25	16,27
25 - 50	33,80
50 - 75	25,20
>75	24,73

Fonte: O Autor.

Os dados mostram que 50,07% das entradas de água que compõem o aquífero fraturado do domínio das rochas metassedimentares se concentram até à profundidade de 50 metros, sendo que apenas 16,27% delas ocorrem entre o manto decomposto e a profundidade de 25 metros; bem diferente dos números apresentados anteriormente para o sistema aquífero das rochas cristalinas.

A dificuldade para estabelecer uma relação na evolução dos teores de ferro da água subterrânea com as profundidades de faturamentos foi à mesma daquela encontrada para o domínio das rochas cristalinas, que se refere ao aproveitamento de águas num poço como o somatório das águas de todos os fraturamentos encontrados. Aqui tem-se agravante de existir em determinadas formações geológicas, sistema aquífero poro-fraturado.

5.1.3 Domínio das rochas sedimentares

Com a quantidade de 152 amostras, o domínio das rochas sedimentares representa 16,17% de todas as amostras de água com teores elevados de ferro, sendo o terceiro domínio hidrogeológico do Estado com a maior quantidade de poços com alto teor de ferro. Esse número é bastante expressivo, considerando que os poços tubulares construídos nestas rochas têm alto custo de perfuração, pois exigem técnicas especiais de construção e são responsáveis por viabilizar projetos importantes de abastecimento do Estado. Esses projetos têm como finalidade levar água de qualidade da bacia sedimentar, através de sistema de adutoras, para sedes municipais e diversas localidades do meio rural, situadas sobre rochas que compõem o domínio cristalino.

Para facilitar a análise dos dados, foram construídos, 4 mapas representando os compartimentos sedimentares do Estado: Bacia do Tucano, Bacia do Recôncavo-Camamu, Sedimentos Litorâneos e Sedimentos Urucuia.

O mapa da Figura 26 apresenta a localização dos 494 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, no domínio das rochas sedimentares; enquanto o mapa da Figura 27 corresponde à localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, no compartimento Bacia do Tucano.

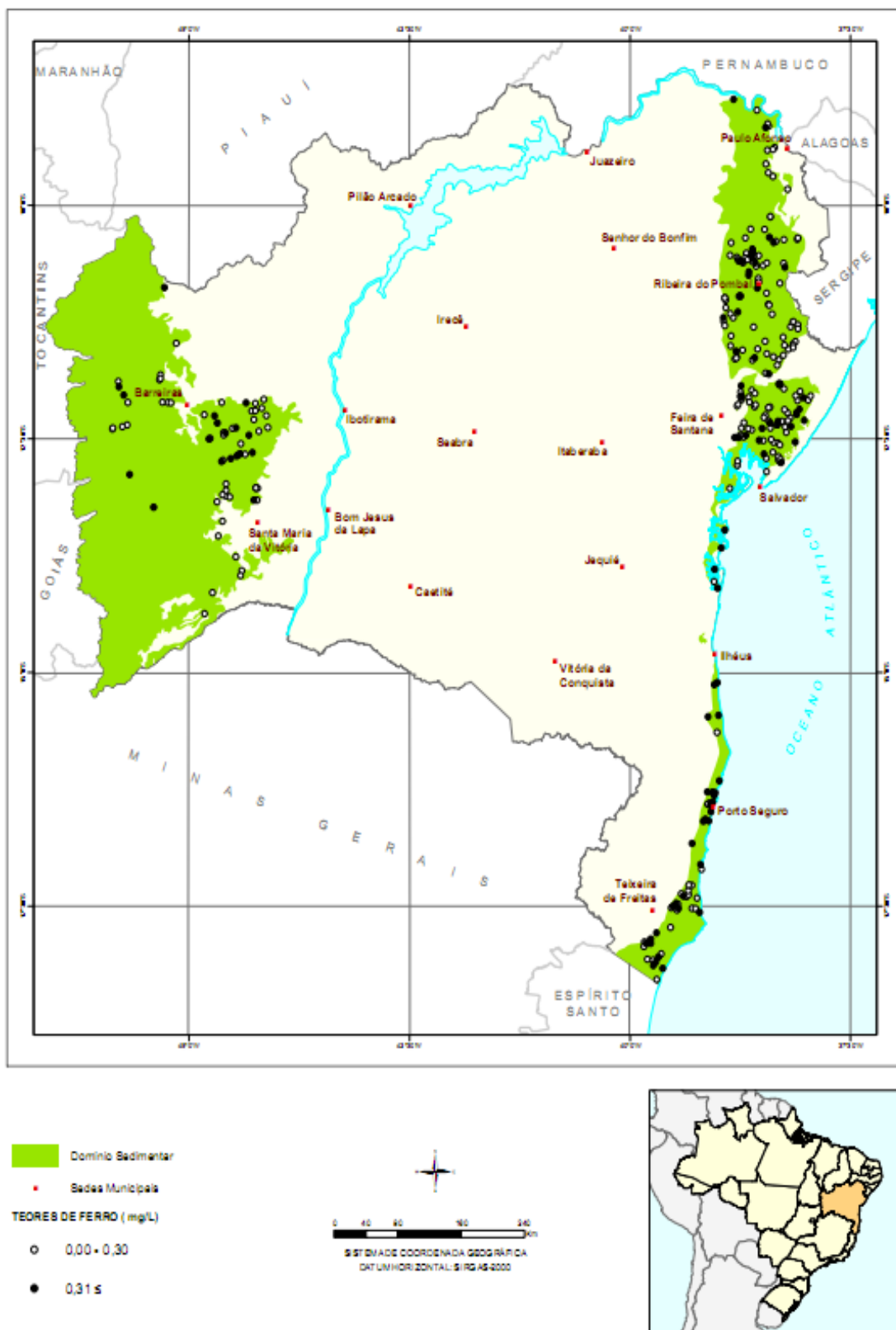
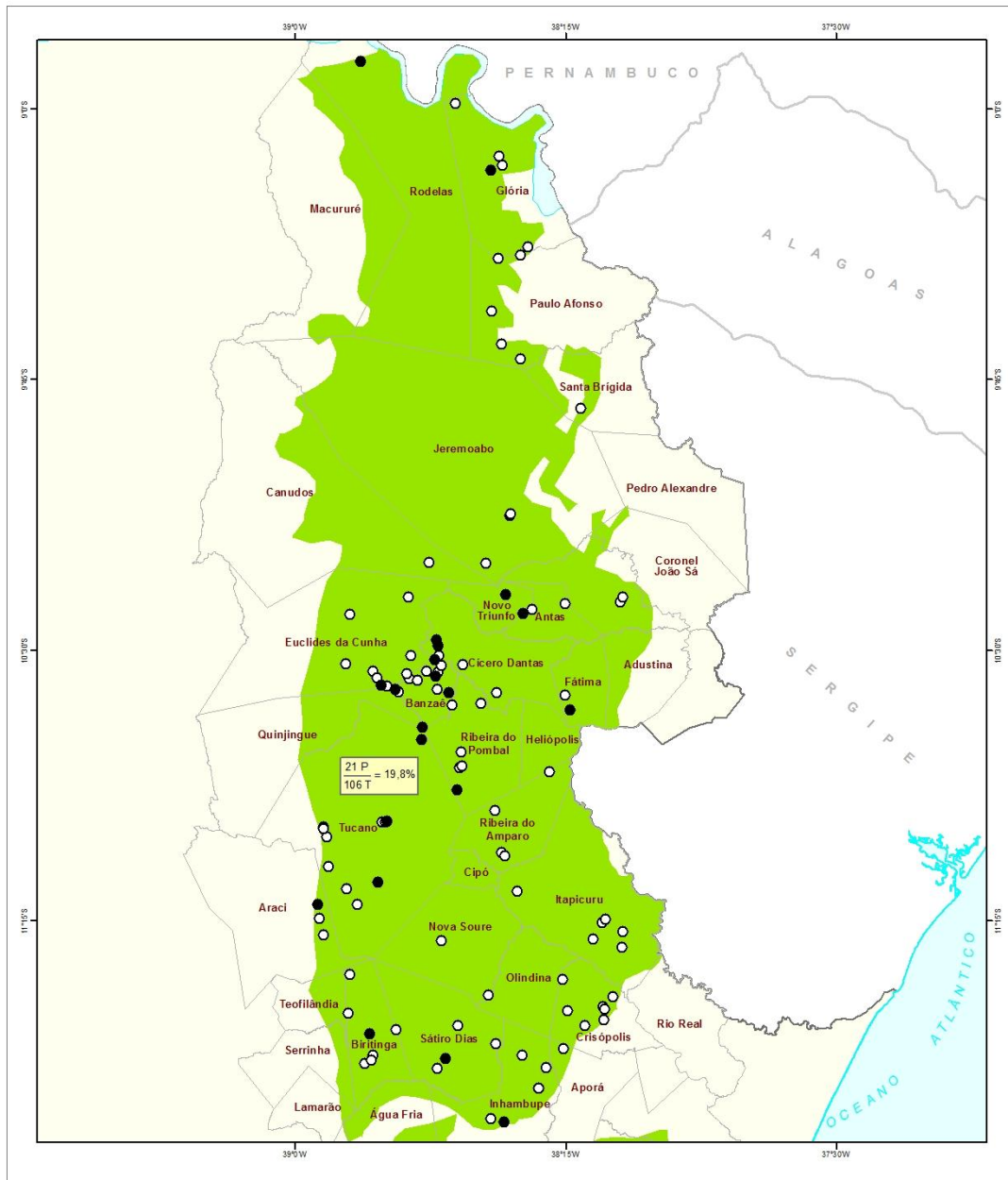


Figura 26. Mapa de localização dos 494 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m³/h, no domínio hidrogeológico das rochas sedimentares. Fonte: O Autor.



Domínio Sedimentar

TEORES DE FERRO (mg/L)

○ 0,00 - 0,30

● 0,31 ≤

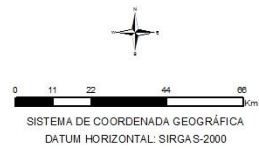


Figura 27. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3mg/L e vazão $\geq 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, no compartimento Bacia do Tucano. Fonte: O Autor.

O mapa da Figura 27 mostra que foram encontrados poços com altos teores de ferro na água (19,8%) nos municípios de Antas, Araci, Banzaê, Biritinga, Cícero Dantas, Euclides da Cunha, Glória, Fátima, Novo Triunfo, Ribeira do Pombal, Rodelas, Sátiro Dias e Tucano. Os municípios que tiveram as mais altas concentrações de ferro (acima de 2,00 mg/L) foram: Banzaê e Cícero Dantas, cujos poços se destinam a atender aos Projetos Tucano-Fase II e Irrigação. Os dados relativos a esses poços estão apresentados no Quadro 5.

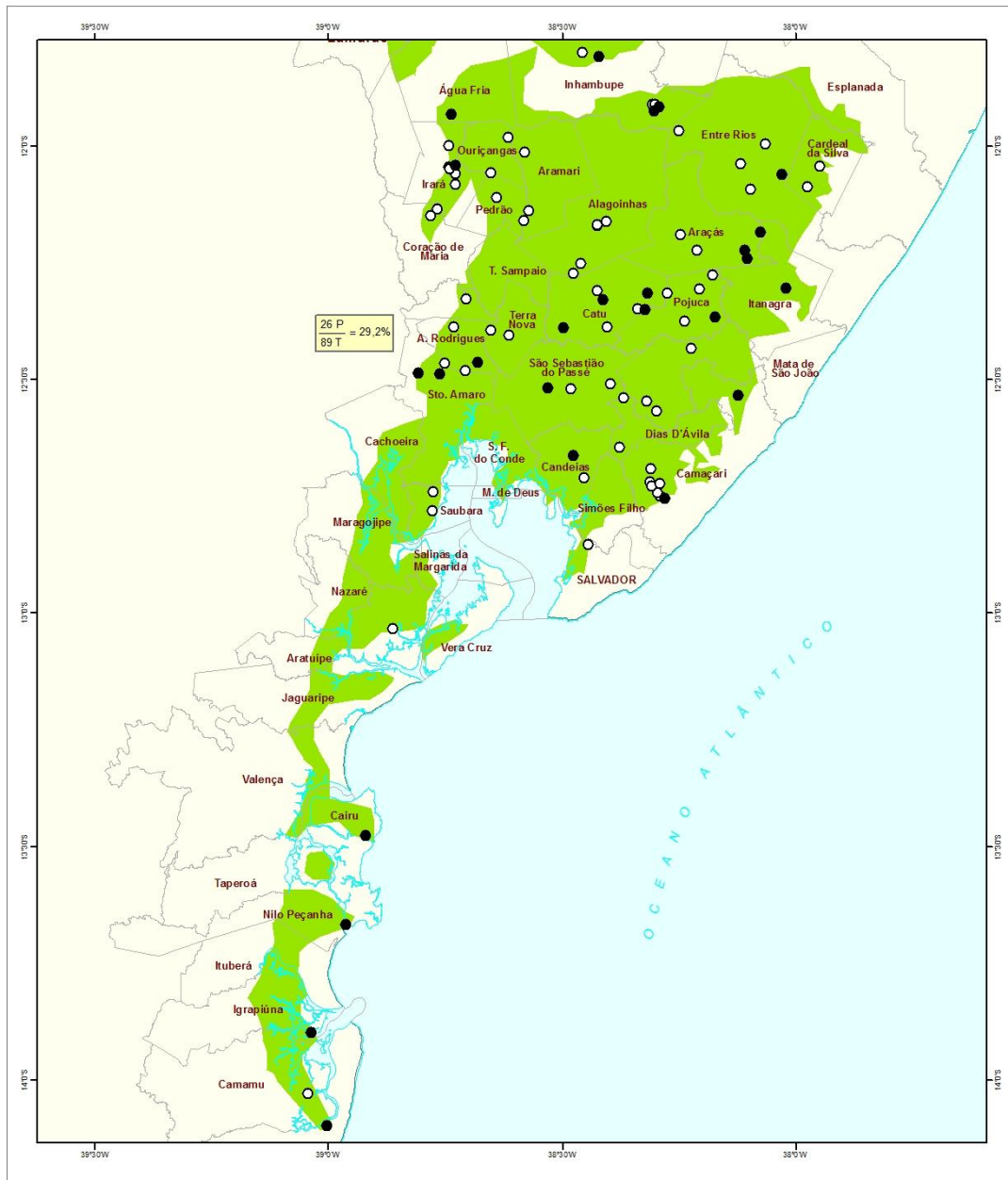
Quadro 5. Poços tubulares perfurados na Bacia do Tucano com alta concentração de ferro

Município	Localidade	Profundidade (m)	Q (m ³ /h)	Fe (mg/L)	Cor (uH)	Turbidez (UT)
Banzaê	Campo do Brito	400,00	260,00	2,83	8,0	8,7
	Sítio do Salgado	414,00	300,00	9,69	2,5	6,1
Cícero Dantas	Itaparica	400,00	260,00	6,69	10,0	6,8
	Major	386,00	260,00	9,65	15,0	11,0
	Serrão	416,00	240,00	8,19	40,0	31,0

Nota: Os números em negrito estão fora dos padrões aceitáveis para o consumo humano. Fonte: O Autor.

Esses poços foram projetados e construídos para captar água do Sistema Aquífero Marizal/Massacará. Assim, no compartimento da Bacia do Tucano, os mais altos teores de ferro mostram-se mais intimamente relacionados a este sistema aquífero, especialmente na região que engloba os municípios de Banzaê, Cícero Dantas e Euclides da Cunha.

O mapa da Figura 28 corresponde à localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1 \text{ m}^3/\text{h}$, no compartimento Bacia do Recôncavo-Camamu.



Domínio Sedimentar

TEORES DE FERRO (mg/L)

○ 0,00 - 0,30

● 0,31 ≤

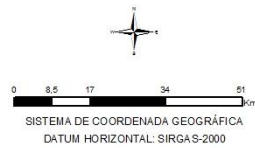
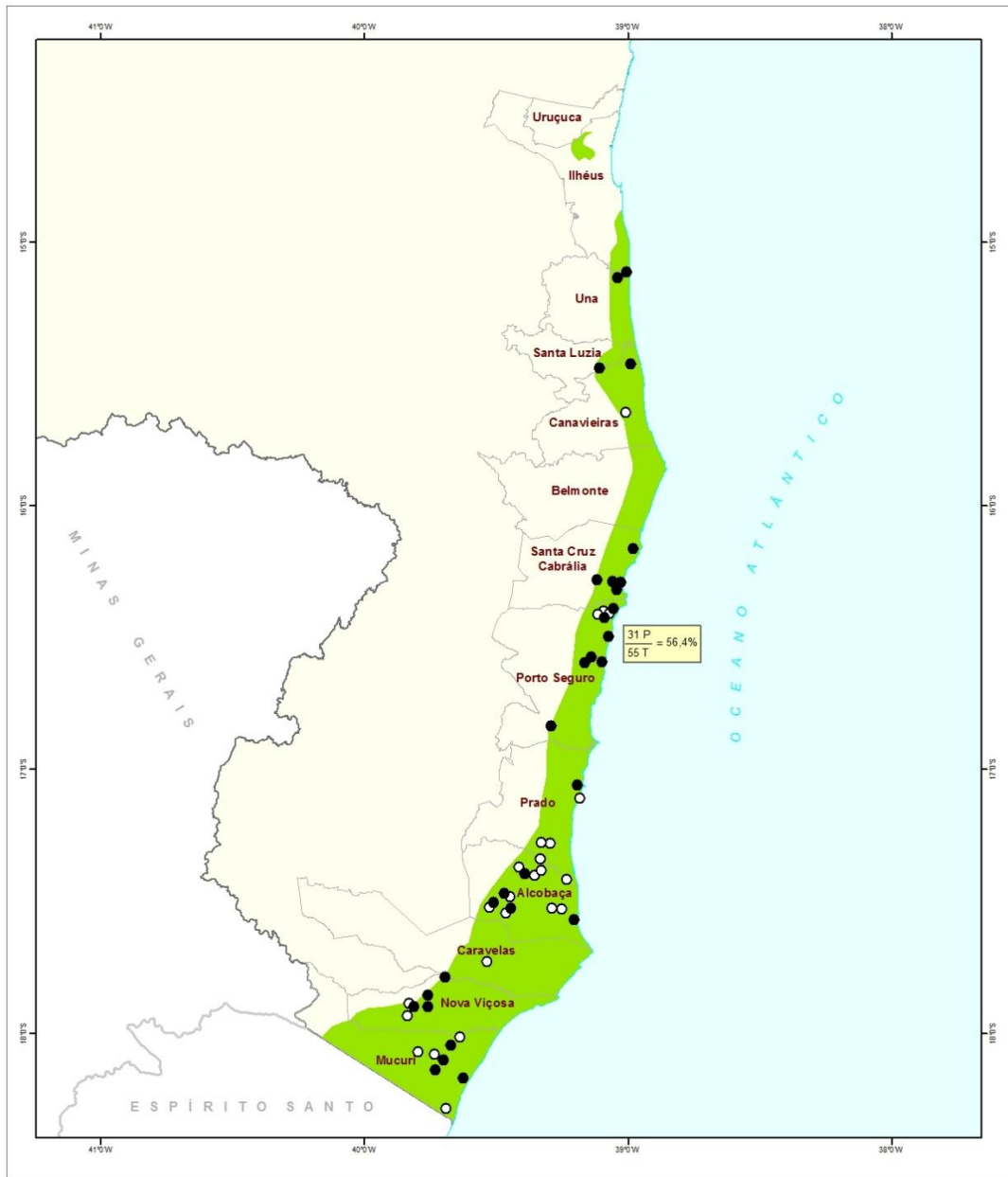


Figura 28. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3mg/L e vazão $\geq 1,0$ m³/h, no compartimento Bacia do Recôncavo-Camamu. Fonte: O Autor.

De acordo com este mapa, o ferro encontra-se presente em todos os aquíferos que compõem a Bacia do Recôncavo, sendo encontrados 26 poços com ferro alto (29,2%) de um total de 89 poços perfurados no período 2003-2013. Os municípios que apresentaram teores elevados de ferro na água neste compartimento, bem como os aquíferos correspondentes foram: Água Fria, Irará, Amélia Rodrigues e Santo Amaro (aquífero Sergi); Inhambupe, Catu, São Sebastião, Pojuca e Candeias (aquífero Ilhas); Entre Rios, Araçás, Itanagra, Dias D'Ávila e Camaçari (sistema aquífero Marizal/São Sebastião). Nesses poços os teores de ferro não ultrapassaram 2,5 mg/L.

Na Bacia de Camamu o destaque é o poço perfurado no município de Igrapiúna, localidade de Ambar, cujo teor de ferro alcançou 5,79 mg/L. Os teores de ferro encontrados nos poços perfurados nos municípios de Cairú, Taperoá e Maraú, não ultrapassaram 1,00 mg/L.

O mapa da Figura 29 corresponde à localização dos poços tubulares perfurados no compartimento dos Sedimentos Litorâneos, com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$.



Domínio Sedimentar

TEORES DE FERRO (mg/L)

- 0,00 - 0,30
- 0,31 ≤



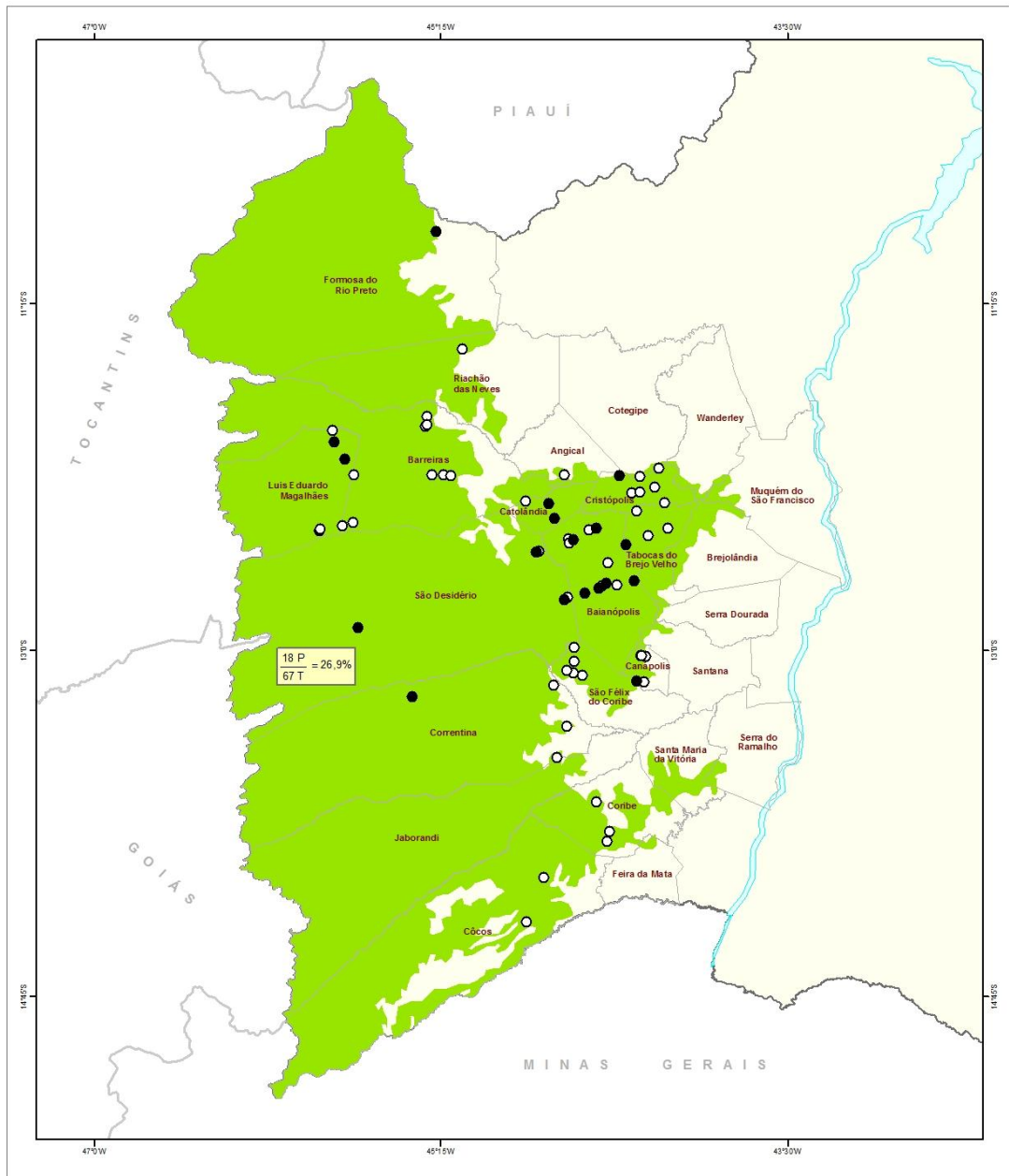
Figura 29. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3mg/L e vazão $\geq 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, no compartimento Sedimentos Litorâneos. Fonte: O Autor.

Conforme apresentado no mapa da Figura 29, os altos teores de ferro encontram-se presentes em todo o compartimento dos sedimentos litorâneos.

A parte oeste desse compartimento limita-se com os granulitos do compartimento Cristalino Centro-Sul, que fazem parte do grupo de rochas potencialmente ricas em ferro (item 2.6.5). Nessa região eles encontram-se submetidos aos climas: úmido e subúmido, cuja análise foi apresentada no item 5.1.1.

A direção do fluxo subterrâneo nessa região ocorre no sentido oeste-leste (granulitos-sedimentos). As condições de clima da região favorecem o desenvolvimento de espessos mantos de decomposição sobre essas rochas matrizes. O ferro presente no regolito se desloca facilmente pelos espaços intergranulares dos sedimentos litorâneos, indo participar da hidroquímica das águas subterrâneas desse aquífero, vindo a comprometer essas águas para o consumo humano. Assim, justifica-se encontrar um percentual de 56,4% dos poços com teor de ferro $>0,3\text{mg/L}$.

O mapa da Figura 30 apresenta a localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de $0,3\text{ mg/L}$ e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, no compartimento Urucuia.



Domínio Sedimentar

TEORES DE FERRO (mg/L)

○ 0,00 - 0,30

● 0,31 ≤



Figura 30. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3mg/L e vazão $\geq 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, no compartimento Urucui. Fonte: O Autor.

De acordo com a disposição dos poços no mapa da Figura 30, observa-se uma evolução na densidade de poços com ferro alto no sentido oeste-leste, que coincide com a direção de fluxo da água subterrânea na região, e no sentido inverso da espessura do pacote sedimentar, que decresce neste sentido. Essa densidade de poços está compreendida nos municípios de Catolândia, Baianópolis, extremo leste de São Desidério, Cristópolis e Tabocas do Brejo Velho, onde a espessura do pacote sedimentar Urucuia é bem menor.

Os teores de ferro encontrados na água subterrânea desse compartimento (26,9%) podem estar associados ao conglomerado posicionado na base do pacote Urucuia, constituído de seixos de sílex e calcário cimentados por sílica e óxidos de ferro. Por essa razão, quanto menor a espessura do Urucuia, maior a influência do nível basal na qualidade química da água.

5.1.4 Domínio das rochas calcárias

Os calcários contribuíram com 93 amostras com ferro alto, com a participação de apenas 9,89% sobre o total de amostras contendo elevadas concentrações de ferro (940 amostras). Dessa forma, o calcário é considerado o domínio hidrogeológico com o menor índice de poços tubulares com alto teor de ferro. Este domínio foi dividido em dois compartimentos para análise: Calcários da Chapada Diamantina (Grupo Una) e Calcários do Oeste (Grupo Bambuí).

O mapa da Figura 31 apresenta a localização dos 660 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, no domínio das rochas calcárias; enquanto o mapa da Figura 32 corresponde à localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, no compartimento dos Calcários da Chapada Diamantina, nas sub-bacias: Irecê (no centro), Campinas (a nordeste) e Una-Utinga (a sudeste).

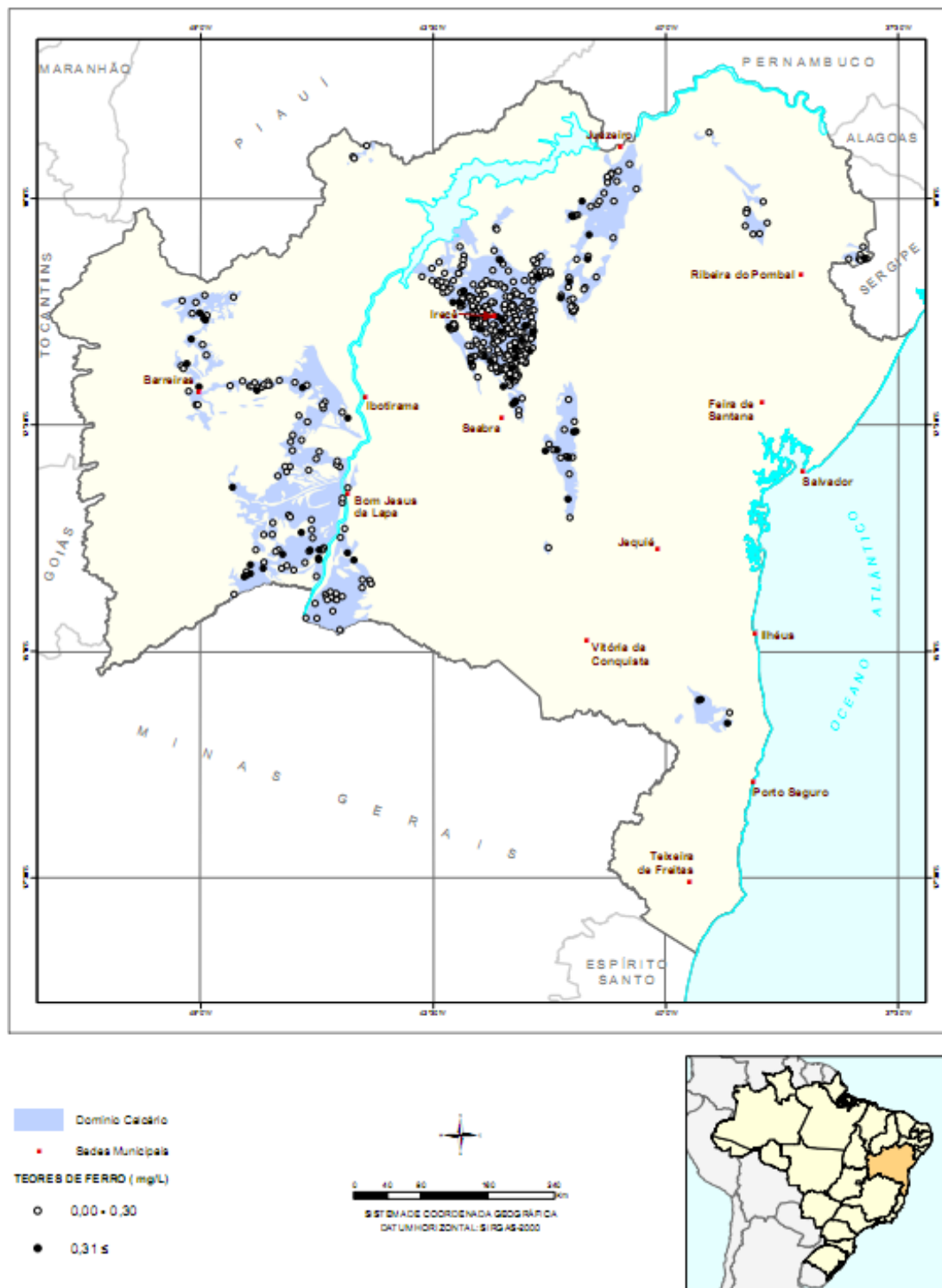
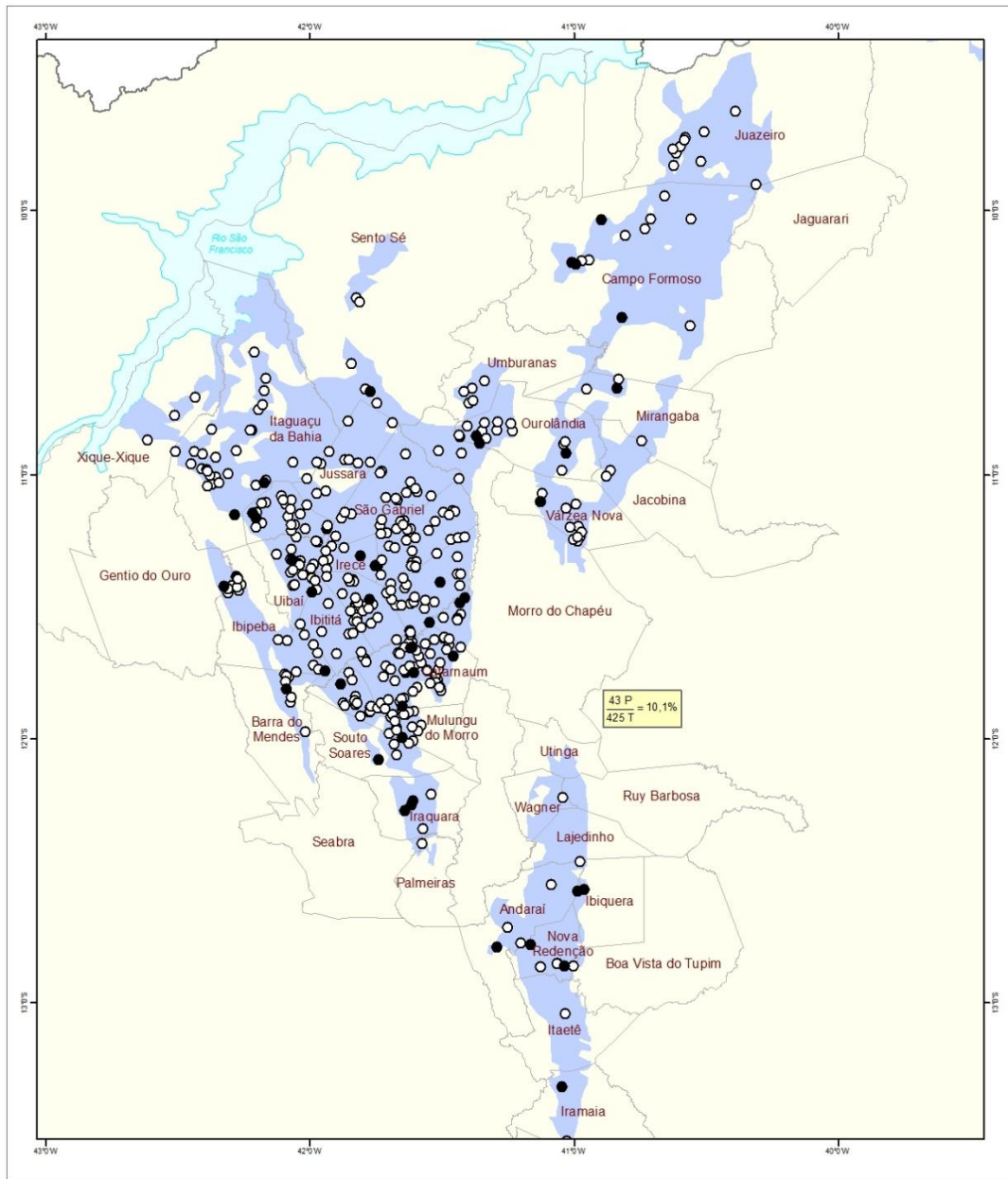


Figura 31. Mapa de localização dos 660 poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e vazão $\geq 1,0$ m³/h, no domínio hidrogeológico das rochas calcárias. Fonte: O Autor.



Domínio Calcário

TEORES DE FERRO (mg/L)

○ 0,00 - 0,30

● 0,31 ≤

0 15 30 60 90 120 m

SISTEMA DE COORDENADA GEOGRÁFICA
DATUM HORIZONTAL: SIRGAS-2000



Figura 32. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3mg/L e vazão $\geq 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, no compartimento dos Calcários da Chapada Diamantina. Fonte: O Autor.

De acordo com o mapa da Figura 32, de um modo geral os teores mais elevados de ferro nos calcários da Chapada Diamantina são identificados nos poços perfurados nas proximidades do contato com as rochas metassedimentares. A explicação pode está no fato de que parte das águas do aquífero metassedimentar da Chapada Diamantina serve de recarga para o aquífero cárstico, posicionado topograficamente em cota inferior. À medida que os poços são perfurados em direção ao centro da bacia, uma significativa melhoria na qualidade da água, no que se refere aos teores de ferro se constata por percentual de 10,10% somente de poços com teor $>0,3\text{mg/L}$. Isso se deve muito provavelmente ao aporte de novas águas à bacia, principalmente as pluviométricas, que provocam aumento significativo nas vazões dos poços com consequente diluição dos teores excedentes de ferro nas águas.

O mapa da Figura 33 apresenta a localização dos poços tubulares com teores de ferro acima e abaixo de $0,30\text{ mg/L}$ e vazão $\geq 1\text{m}^3/\text{h}$, no compartimento dos Calcários Bambuí do Oeste Baiano.

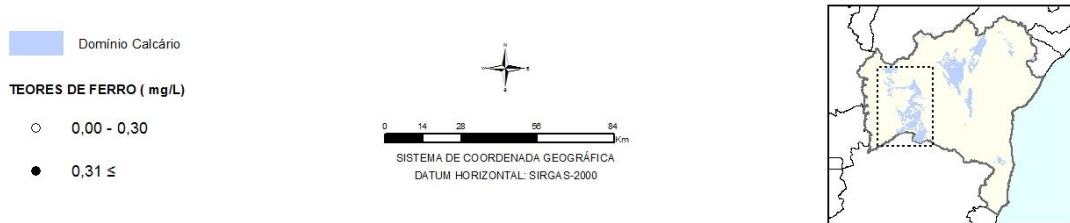
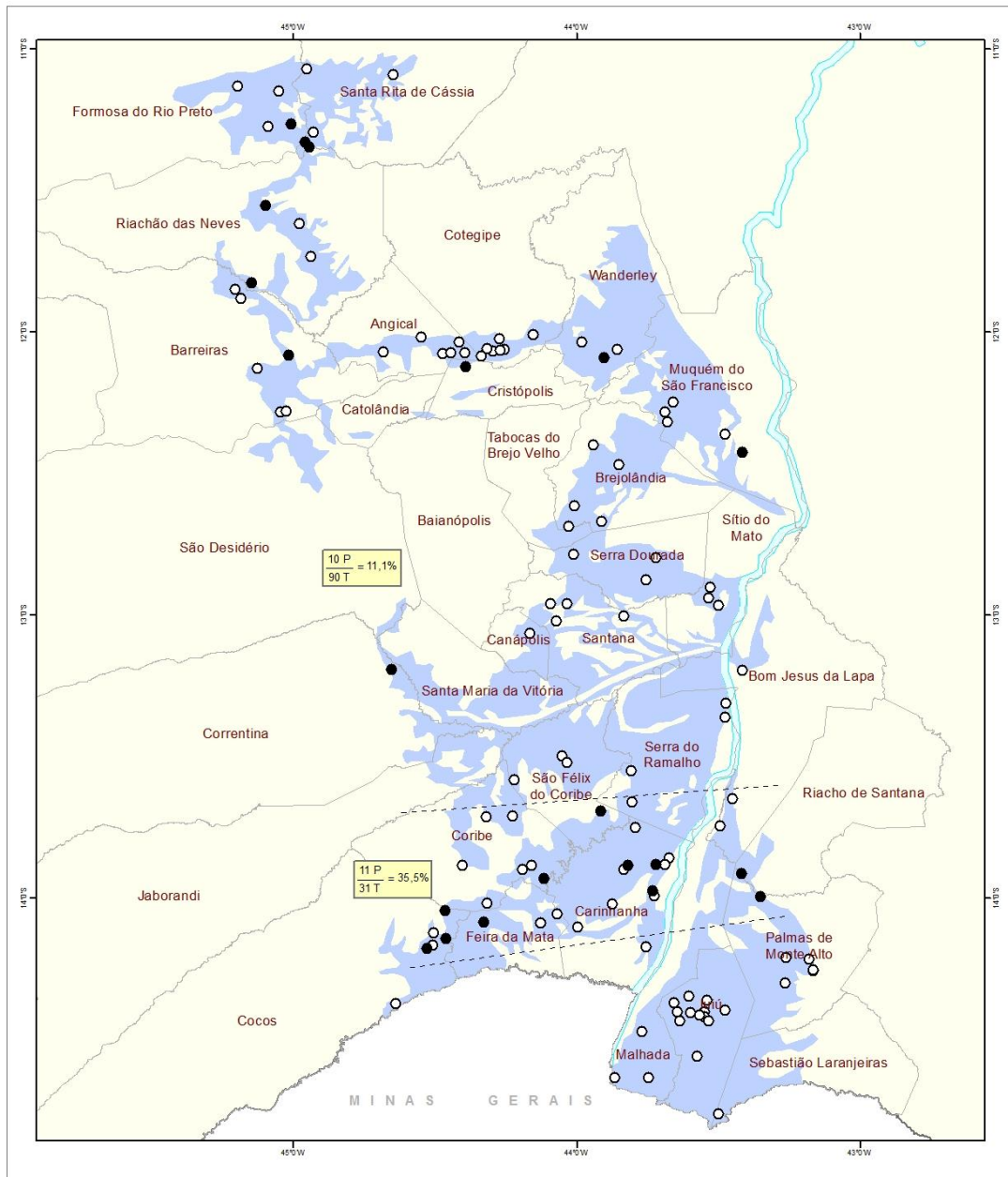


Figura 33. Mapa de localização dos poços com teores de ferro abaixo e acima de 0,3mg/L e vazão $\geq 1,0$ m³/h, no compartimento dos Calcários do Oeste. Fonte: O Autor.

O mapa mostra que no compartimento dos calcários do Oeste ocorrem pontos dispersos que representam os poços com teores elevados de ferro, totalizando 11,1% de poços com teor de ferro $>0,3$ mg/L. Estes poços encontram-se localizados nos municípios de Formosa do Rio Preto, Santa Rita de Cássia, Riachão das Neves, Barreiras, Cristópolis, Correntina, Wanderley e Muquém do São Francisco. Na região que compreende os municípios de Cocos, Feira da Mata, Coribe, São Félix do Coribe, Carinhanha e Palmas de Monte Alto, verifica-se uma nova tendência de densidade, com quantidade bem mais expressiva de poços contendo ferro alto (percentual de 35,5%). Esta região recebe contribuição de recarga tanto do lado oeste através do Urucuia, onde está presente o conglomerado basal, descrito no item 5.1.3, e das rochas cristalinas ocorrentes nos municípios de Jaborandi, Cocos e Feira da Mata, como do lado leste, pelos metassedimentos do Grupo Espinhaço (item 5.1.2).

A Tabela 10 reporta-se às entradas de água (E.A), em percentual, por faixa de profundidade, no domínio das rochas calcárias.

Tabela 10. Percentual de ocorrência das entradas de água por faixa de profundidade

Faixa de profundidade de E.A (m)	Percentual de ocorrência (%)
0 - 25	12,70
25 - 50	25,57
50 - 75	30,69
>75	31,04

Fonte: O Autor.

Observando os dados da tabela percebe-se que apenas 38,27% das entradas de água que compõem o aquífero cárstico/fraturado se concentram até à profundidade de 50 metros, estando 61,73% dos fraturamentos abaixo desta profundidade.

Além do fator litológico (rocha de origem química, de composição predominantemente carbonática), a fraca incidência de fraturamentos em pequenas profundidades pode estar contribuindo para a reduzida quantidade de poços com teores elevados de ferro nas águas subterrâneas deste domínio. A menor resistência das rochas calcárias – característica que facilita a expansão do sistema fraturado sob a ação de águas ácidas – proporciona também uma

melhor condição de fluxo das águas pluviométricas e das águas provenientes de descargas de outros aquíferos nos fraturamentos mais profundos, contribuindo para a diluição do íon ferro. É possível que a união desses fatores tenha contribuído favoravelmente para que o domínio hidrogeológico das rochas calcárias apresente a menor quantidade de poços com elevados teores de ferro.

5.2 Definição das notas: importância dos fatores naturais sobre o teor de ferro na água subterrânea

As notas de influência da litologia, do clima, da vegetação e do solo, nas concentrações de ferro da água subterrânea do Estado da Bahia foram definidas com a construção de cada gráfico de dispersão do teor de ferro versus nota do parâmetro, gráficos 34 a 37.

5.2.1 Litologia

O gráfico da Figura 34 apresenta a distribuição dos altos teores de ferro encontrados na água subterrânea por domínio hidrogeológico do Estado da Bahia.

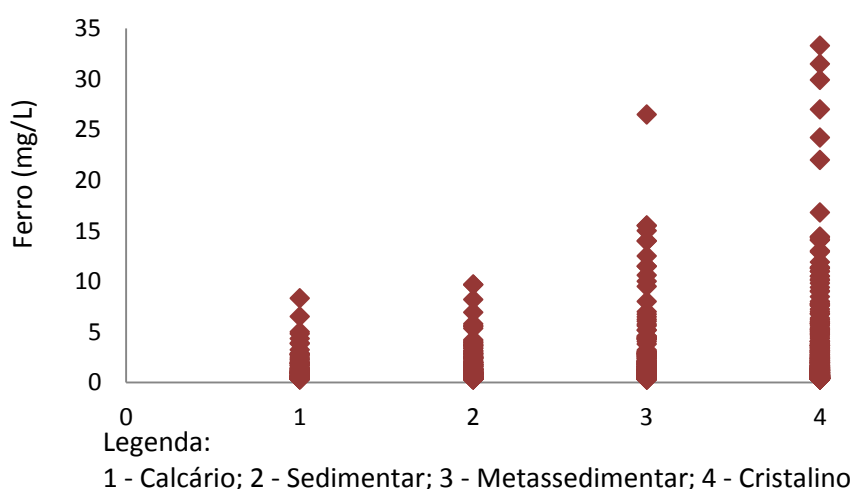


Figura 34. Diagrama de dispersão dos altos teores de ferro por domínio hidrogeológico do Estado da Bahia. Fonte: O Autor.

O diagrama mostra o seguinte padrão de distribuição dos teores de ferro por domínio hidrogeológico: no domínio das rochas cristalinas é encontrada a maior concentração de ferro na água subterrânea do Estado, com 33,30 mg/L e média de 2,42 mg/L, seguida do domínio das metassedimentares, que alcança valor máximo de 26,50 mg/L e média de 2,15 mg/L. Nos domínios das rochas sedimentares (9,69 mg/L) e calcárias (8,32 mg/L), são encontrados os menores teores de ferro na água subterrânea da Bahia.

Assim foi mensurada as notas de influência da litologia na concentração de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia. As notas definidas foram: Calcário = 1,0; sedimentar = 2,0; metassedimentar = 3,0 e cristalino = 4,0. Como foi visto anteriormente que fatores podem estar contribuindo para que as maiores concentrações de ferro estejam associadas ao domínio das rochas cristalinas: corpos máfico-ultramáficos, greenstone belts e granulitos heterogêneos orto e paraderivados e maior incidência de fraturamentos mais superficiais.

5.2.2 *Clima*

Semelhantemente, o gráfico da Figura 35 mostra a distribuição dos altos teores de ferro na água subterrânea do Estado da Bahia, em função dos tipos de climas.

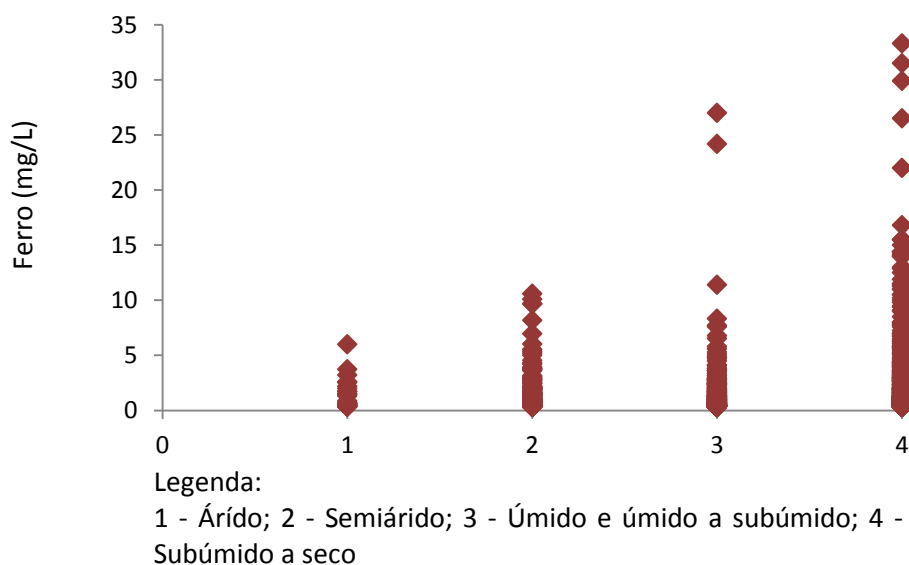


Figura 35. Diagrama de dispersão dos altos teores de ferro por tipo de clima do Estado da Bahia. Fonte: O Autor.

O padrão de distribuição dos teores máximos de ferro por tipo de clima apresentado pelo diagrama de dispersão é: 33,30 mg/L e média de 2,50 mg/L no clima subúmido a seco; 27,00 mg/L e média de 2,44 mg/L nos climas úmido e úmido a subúmido; 10,60 mg/L e média de 1,73 mg/L no semiárido, e, 6,00 mg/L e média de 1,66 mg/L no árido.

A partir da observação desse formato de distribuição dos altos teores de ferro nos diferentes climas, foi possível arbitrar as notas de influência dos climas sobre os teores de ferro na água subterrânea do Estado: árido = 1,0; semiárido = 2,0; úmido e úmido a subúmido = 3,0 e subúmido a seco = 4,0.

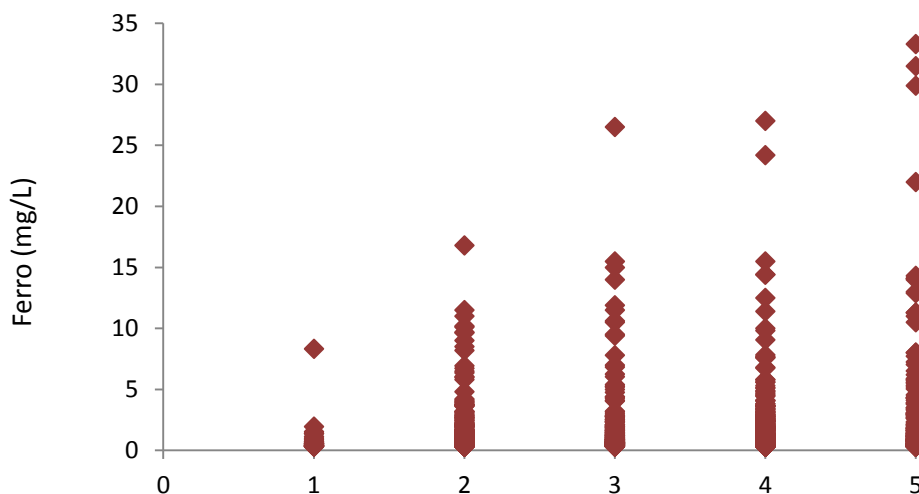
Embora nos climas úmido e úmido a subúmido se concentre a maior quantidade de poços contendo ferro alto, é no clima subúmido a seco que se verificam os mais altos valores de teores de ferro registrados nesta pesquisa.

Uma provável justificativa para isso é que os climas úmido e úmido a subúmido favorecem a ocorrência de densas florestas com presença marcante de matéria orgânica, na qual o ferro existente tende a estar ligado ou combinado, favorecendo a forte densidade de poços com ferro acima de 0,3 mg/L. Por outro lado, o aumento de temperatura acelera o processo de reações químicas, sendo a causa mais provável dos mais altos teores de ferro na água subterrânea do Estado da Bahia estarem associados ao clima subúmido a seco, onde se verificam disponibilidade hídrica e aumento de temperatura.

Avaliando até aqui a influência da litologia e do clima na evolução dos altos teores de ferro da água subterrânea do Estado da Bahia, pode-se dizer que, embora 60% das rochas cristalinas estejam sob as condições de clima semiárido, não foram revelados neste tipo de clima os maiores teores de ferro solúvel na água. É possível que, se por um lado o domínio das rochas cristalinas abrange a maior quantidade de unidades litológicas portadoras de ferro (item 2.6), com maior exposição no território baiano, por outro lado, o clima controla a dispersão desse elemento em função da capacidade de formar ou não mantos intempéricos (item 2.7.1). Daí a importância da combinação destes fatores na evolução dos teores de ferro na água subterrânea.

5.2.3 Vegetação

Do mesmo modo, o gráfico da Figura 36 apresenta a distribuição dos altos teores de ferro na água subterrânea por ecoregiões do Estado da Bahia.



Legenda:

- 1 - Cerrado; 2 - Caatinga; 3 - Chapada Diamantina ;
- 4- Florestas Costeiras/ Florestas do Interior da Bahia;
- 5- Florestas Secas do Nordeste

Figura 36. Diagrama de dispersão dos altos teores de ferro por ecoregiões do Estado da Bahia. Fonte: O Autor.

O gráfico mostra que nas ecoregiões de florestas secas do Nordeste, típicas de regiões de clima subúmido a seco, o ferro na água subterrânea alcançou o valor mais elevado (33,30 mg/L e média de 2,23 mg/L), seguido das ecoregiões de florestas costeiras/florestas do interior da Bahia (27,00 mg/L e média de 2,52 mg/L), Chapada Diamantina (26,50 mg/L e média de 2,39 mg/L), e com números bem menos expressivos, a caatinga (16,80 mg/L e média de 1,68 mg/L) e o cerrado (8,32 mg/L e média de 1,14 mg/L).

Com base no modelo apresentado no diagrama de dispersão foi possível definir as notas de influência das ecoregiões na concentração de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia: cerrado = 1,0; caatinga = 2,0; Chapada Diamantina = 3,0; florestas costeiras/florestas do interior da Bahia = 4,0; florestas secas do Nordeste = 5,0.

5.2.4 Solo

Também, com o mesmo argumento, o gráfico da Figura 37 apresenta a distribuição dos altos teores de ferro da água subterrânea por tipo de solo do Estado da Bahia. Esse gráfico representa a síntese da interação: litologia, clima e vegetação, tendo o solo como o produto final.

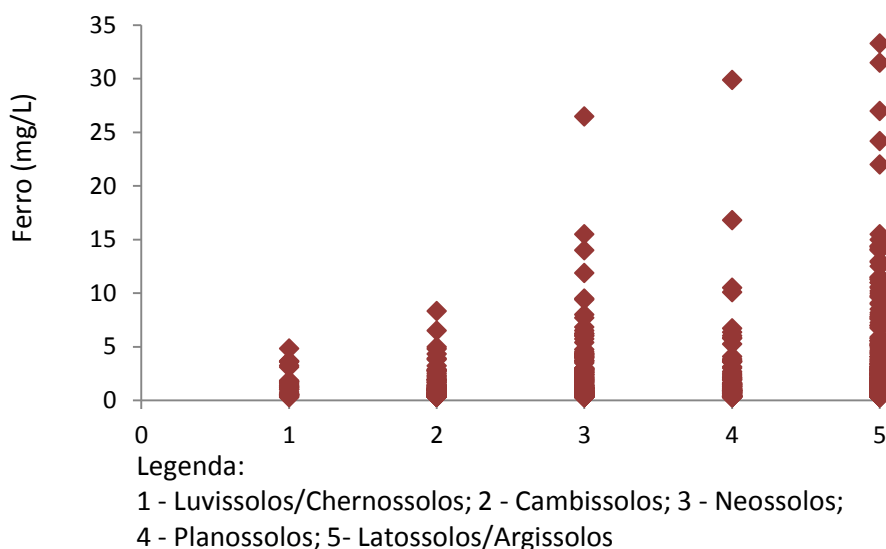


Figura 37. Diagrama de dispersão dos altos teores de ferro por tipo de solo do Estado da Bahia. Fonte: O Autor.

O diagrama revela que nos latossolos/argissolos, planossolos e neossolos, onde se verificam solos mediantemente profundos a profundos e drenagem média a bem drenados, ocorrem os valores mais elevados de ferro no Estado da Bahia: 33,30 mg/L, 29,90 mg/L e 26,50 mg/L (médias de 2,49 mg/L, 1,67 mg/L e 2,43 mg/L), respectivamente, decrescendo significativamente nos solos rasos e pouco profundos, com baixa drenagem, como nos cambissolos (8,32 mg/L e média de 1,56 mg/L) e nos luvisolos/chernossolos (4,85 mg/L e média de 1,18 mg/L).

Baseado na distribuição apresentada no diagrama de dispersão foi possível definir as notas de influência dos solos nos teores de ferro na água subterrânea do Estado da Bahia: 1 - luvisolos/chernossolos; 2 - cambissolos; 3 - neossolos; 4 - planossolos; 5 - latossolos/argissolos.

5.2.5 Síntese dos Valores atribuídos

O Quadro 6 apresenta o resumo das notas aplicadas para os domínios hidrogeológicos, climas, vegetações e solos do Estado da Bahia.

Quadro 6. Notas dadas aos fatores influentes na concentração de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia

VARIÁVEL	TIPO	NOTA
DOMÍNIO HIDROGEOLÓGICO	Cristalino	4
	Metassedimentar	3
	Sedimentar	2
	Calcário	1
SOLO	Latossolos/Argissolos	5
	Planossolos	4
	Neossolos	3
	Cambissolos	2
	Luvissolos/Chevossolos	1
ECORREGIÃO	Floresta Seca do Nordeste	5
	Floresta Costeira/Interior	4
	Chapada Diamantina	3
	Caatinga	2
	Cerrado	1
CLIMA	Subúmido a Seco	4
	Úmido e úmido a subúmido	3
	Semiárido	2
	Árido	1

Fonte: O Autor.

5.3 Tratamento estatístico dos dados

5.3.1 Estatística descritiva

A Tabela 11 exhibe a distribuição do ferro das amostras de água subterrânea do Estado da Bahia, por classes, com intervalo de teores que variam de 0,00 a 3,45 mg/L. Já a Tabela 13 expõe a distribuição dos teores de ferro somente acima de 0,3 mg/L, por intervalo de classes.

Tabela 11. Distribuição dos teores de ferro (0,00 a 3,45 mg/L) por intervalo de classes

CLASSES	FREQUÊNCIA	%	MÉDIA
0,00 – 0,15	2.160	63,76	0,08
0,15 – 0,30	386	11,39	0,23
0,30 – 0,45	179	5,27	0,38
0,45 – 0,60	138	4,06	0,53
0,60 – 0,75	87	2,56	0,68
0,75 – 0,90	59	1,73	0,83
0,90 – 1,05	60	1,76	0,97
1,05 – 1,20	49	1,44	1,13
1,20 – 1,35	45	1,32	1,28
1,35 – 1,50	34	0,99	1,43
1,50 – 1,65	24	0,70	1,60
1,65 – 1,80	23	0,67	1,74
1,80 – 1,95	23	0,67	1,90
1,95 – 2,10	23	0,67	2,03
2,10 – 2,25	12	0,34	2,18
2,25 – 2,40	16	0,47	2,35
2,40 – 2,55	14	0,41	2,48
2,55 – 2,70	10	0,30	2,64
2,70 – 2,85	14	0,41	2,78
2,85 – 3,00	15	0,44	2,93
3,00 – 3,15	10	0,30	3,10
3,15 – 3,30	6	0,18	3,21
3,30 – 3,45	5	0,15	3,37

Nota: número de classes: 23. Valor do Intervalo: 0,15. Média: 0,342. Desvio Padrão: 0,475. Coeficiente de Variação: 138,89%. Fonte: O Autor.

Tabela 12. Distribuição dos teores de ferro $\geq 0,31$ mg/L por intervalo de classes

CLASSES	FREQUÊNCIA	%	MÉDIA
0,31 – 1,88	666	70,85	1,09
1,88 – 3,45	137	14,57	2,67
3,45 – 5,01	49	5,21	4,23
5,01 – 6,58	26	2,76	5,80
6,58 – 8,14	16	1,70	7,36
8,14 – 9,71	9	0,96	8,93
9,71 – 11,27	8	0,85	10,49
11,27 – 12,84	7	0,74	12,06
12,84 – 14,40	9	0,96	13,62
14,40 – 15,97	3	0,32	15,19
15,97 – 17,53	1	0,01	16,75
17,53 – 19,10	0	0,00	18,32
19,10 – 20,66	0	0,00	19,88
20,66 – 22,23	1	0,01	21,45
22,23 – 23,79	0	0,00	23,01
23,79 – 25,36	1	0,01	24,58
25,36 – 26,92	1	0,01	26,14
26,92 – 28,49	1	0,01	27,71
28,49 – 31,05	1	0,01	29,27
31,05 – 33,61	1	0,01	30,84

Nota: número de classes: 20. Valor do Intervalo: 1,57. Média: 2,299. Desvio Padrão: 2,948. Coeficiente de Variação: 128,23%. Fonte: O Autor.

Os histogramas das Figuras 38 (a - b), construídos a partir das Tabelas 12 e 13, correspondem a dois universos amostrais: o primeiro com 3.392 amostras (96% do total do universo pesquisado), representando aí os teores de ferro abaixo e acima de 0,3 mg/L e o segundo universo com as 940 amostras apenas com teores de ferro acima de 0,30 mg/L.

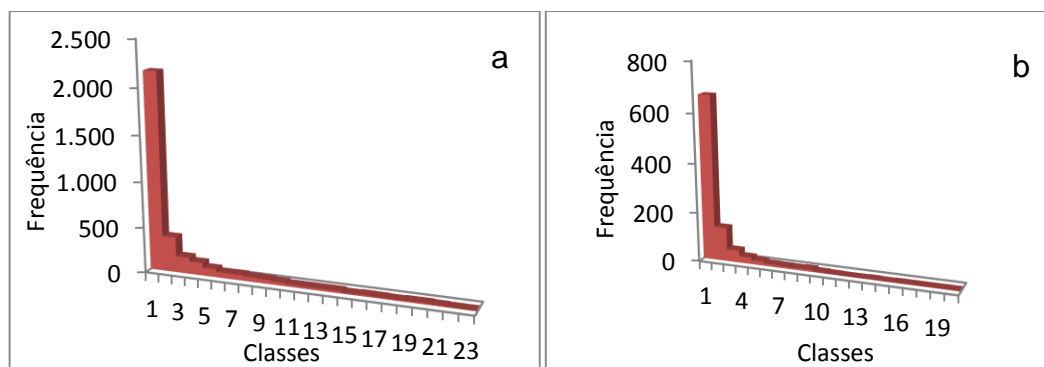


Figura 38. a) Distribuição dos teores de ferro por intervalo de classes, no universo de 3.392 amostras, com ferro abaixo e acima de 0,30 mg/L; b) distribuição dos teores de ferro por intervalo de classes, no universo de 940 amostras com ferro acima de 0,30 mg/L. Fonte: O Autor.

O modelo verificado nos histogramas é bastante semelhante entre si. A distribuição dos teores de ferro por intervalo de concentração, quando a análise dos dados é feita no universo de 3.392 amostras com teores de ferro acima e abaixo de 0,30 mg/L expressa o seguinte padrão: 63,76% no 1º, 11,39% no 2º, 5,27% no 3º e 4,06% no 4º, decrescendo significativamente a partir daí. Quando a análise é feita no universo das 940 amostras enriquecidas em ferro, semelhante distribuição por classe ocorreu: 70,85% na 1ª, 14,57% na 2ª, 5,21% na 3ª e 2,76% na 4ª, decrescendo também significativamente daí para frente. Respectivamente, em ambos os casos, verificam-se valores elevados do coeficiente de variação: 138,89% e 128,23%, indicando forte assimetria dos dados analisados (dados não paramétricos).

5.3.2 Análise bivariada

A Figura 39 apresenta gráficos de correlação linear do ferro versus 15 parâmetros físico-químicos da água subterrânea, no universo das 940 amostras enriquecidas em ferro, para todos os domínios hidrogeológicos.

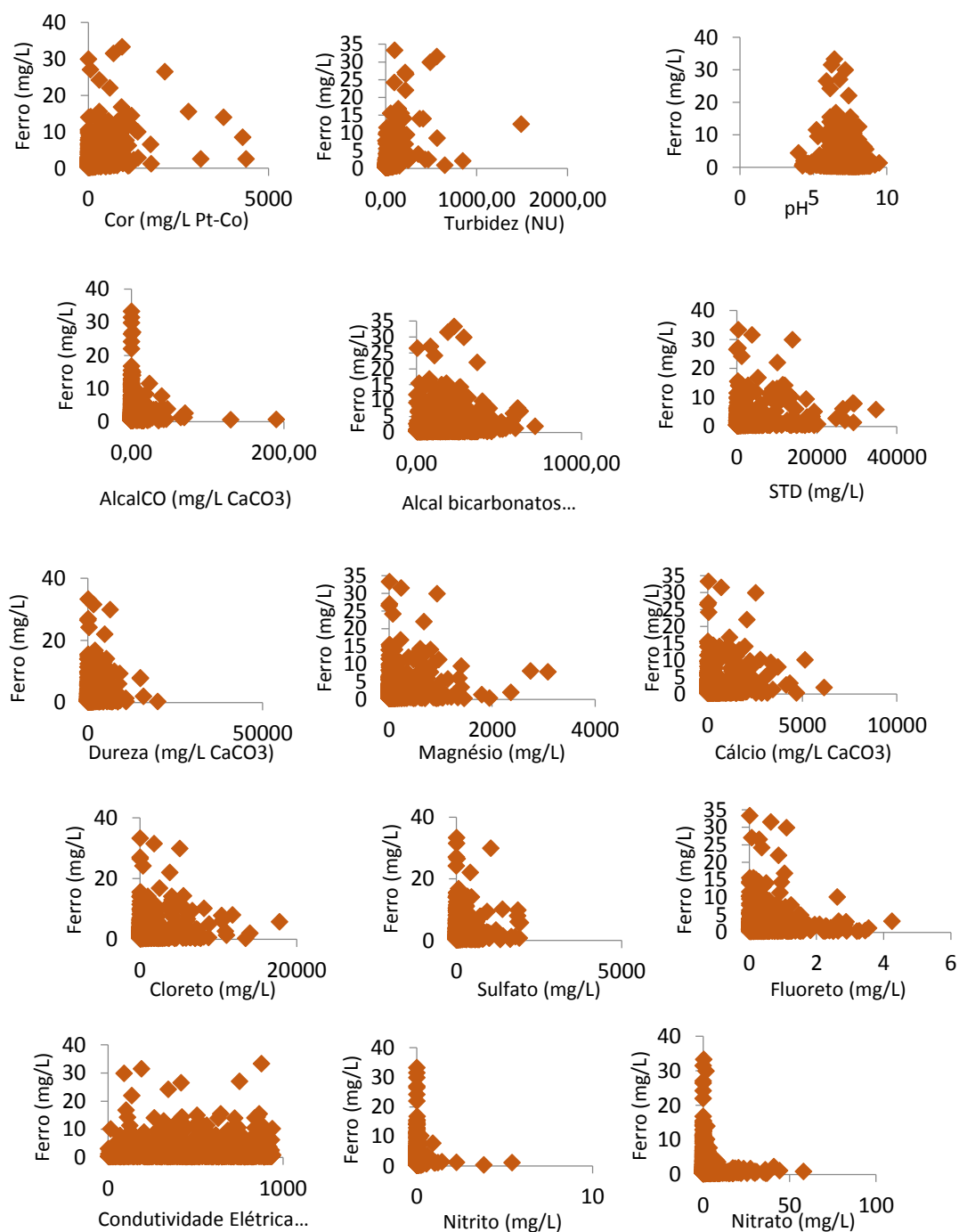


Figura 39. Sequência de gráficos de dispersão mostrando a relação do ferro com 15 parâmetros físico-químicos da água subterrânea. Fonte: O Autor.

Os gráficos apontam para uma correlação linear nula entre o ferro e as variáveis analisadas, evidenciando a total inexistência de correlação entre o ferro e os 15 parâmetros físico-químicos pesquisados: cor aparente, turbidez, pH, alcalinidades de carbonatos e de bicarbonatos, sólidos totais dissolvidos, cálcio, magnésio, dureza total, cloreto, sulfato, fluoreto, condutividade elétrica, nitrito e nitrato.

Os Quadros 7 e 8 apresentam os resultados dos dados processados nas matrizes de Correlação linear de Pearson e Spearman, respectivamente, no universo das 940 amostras de águas subterrâneas enriquecidas em ferro, em todos os domínios hidrogeológicos.

Quadro 7. Matriz de Correlação Linear de Pearson para o universo de 940 amostras de água subterrânea com altos teores de ferro

	STD	Cloreto	Dureza	Nitrato	AlcalHCO	AlcalCO	AlcalOH	Calcio	CE	Cor	Ferro	Fluoreto	Magnésio	Nitrito	PH	Sulfato	Turbidez
STD	1,00																
Cloreto	0,98	1,00															
Dureza	0,96	0,95	1,00														
Nitrato	0,10	0,11	0,13	1,00													
AlcalHCO	0,41	0,37	0,41	0,26	1,00												
AlcalCO	0,09	0,11	0,07	-0,01	0,10	1,00											
AlcalOH	0,06	0,09	0,07	0,03	0,04	0,28	1,00										
Calcio	0,88	0,87	0,93	0,16	0,42	0,05	0,09	1,00									
CE	0,97	0,99	0,93	0,13	0,42	0,12	0,10	0,86	1,00								
Cor	-0,01	-0,02	-0,02	-0,05	-0,07	-0,06	-0,15	-0,02	-0,03	1,00							
Ferro	0,16	0,15	0,16	-0,11	-0,05	-0,06	-0,05	0,17	0,13	0,32	1,00						
Fluoreto	0,34	0,38	0,36	0,19	0,40	0,06	-0,03	0,40	0,40	-0,04	-0,03	1,00					
Magnésio	0,94	0,93	0,97	0,10	0,38	0,08	0,06	0,84	0,91	-0,02	0,15	0,31	1,00				
Nitrito	0,09	0,14	0,12	0,29	0,10	0,02	0,11	0,11	0,15	-0,02	-0,02	0,24	0,12	1,00			
PH	0,00	-0,01	0,01	0,02	0,33	0,21	-0,08	0,02	0,02	-0,01	-0,17	0,19	0,00	0,01	1,00		
Sulfato	0,72	0,68	0,71	0,08	0,36	0,06	0,10	0,72	0,71	-0,04	0,11	0,35	0,66	0,07	0,03	1,00	
Turbidez	0,05	0,03	0,03	-0,04	-0,07	-0,05	-0,03	0,04	0,02	0,75	0,49	-0,05	0,02	-0,03	-0,06	0,01	1,00

Nota: O nível de significância para $\alpha=0,05$ e $n=940$ é **0,20**. Os valores em vermelho expressam uma correlação significativa entre o ferro e os parâmetros físico-químicos da água subterrânea.
Fonte: O Autor

Quadro 8. Matriz de Correlação Linear (Método Spearman) para o universo de 940 amostras de água subterrânea com altos teores de ferro

	STD	Cloreto	Dureza	Nitrato	AlcalHCO	AlcalCO	AlcalOH	Calcio	CE	Cor	Ferro	Fluoreto	Magnesio	Nitrito	PH	Sulfato	Turbidez
STD	1,00	0,91	0,93	0,25	0,75	0,03	0,01	0,90	0,97	-0,01	0,08	0,59	0,92	0,21	0,14	0,81	0,07
Cloreto	0,91	1,00	0,85	0,27	0,60	-0,04	-0,02	0,79	0,93	0,02	0,09	0,55	0,88	0,19	0,02	0,80	0,05
Dureza	0,93	0,85	1,00	0,23	0,81	0,04	0,03	0,98	0,96	-0,03	0,05	0,58	0,96	0,23	0,20	0,78	0,00
Nitrato	0,25	0,27	0,23	1,00	0,23	0,00	0,01	0,23	0,24	-0,08	-0,19	0,17	0,22	0,43	-0,04	0,27	-0,04
AlcalHCO	0,75	0,60	0,81	0,23	1,00	0,08	0,03	0,81	0,78	-0,09	-0,06	0,56	0,75	0,23	0,36	0,66	-0,10
AlcalCO	0,03	-0,04	0,04	0,00	0,08	1,00	0,84	0,06	0,04	-0,55	-0,10	-0,02	0,02	0,11	0,12	-0,01	-0,18
AlcalOH	0,01	-0,02	0,03	0,01	0,03	0,84	1,00	0,05	0,01	-0,57	-0,05	-0,07	0,02	0,13	-0,10	-0,02	-0,15
Calcio	0,90	0,79	0,98	0,23	0,81	0,06	0,05	1,00	0,92	-0,03	0,04	0,57	0,90	0,24	0,22	0,76	0,00
CE	0,97	0,93	0,96	0,24	0,78	0,04	0,01	0,92	1,00	-0,03	0,04	0,61	0,94	0,21	0,17	0,82	-0,01
Cor	-0,01	0,02	-0,03	-0,08	-0,09	-0,55	-0,57	-0,03	-0,03	1,00	0,42	0,04	-0,03	-0,10	-0,05	0,01	0,54
Ferro	0,08	0,09	0,05	-0,19	-0,06	-0,10	-0,05	0,04	0,04	0,42	1,00	-0,02	0,05	-0,08	-0,19	0,02	0,63
Fluoreto	0,59	0,55	0,58	0,17	0,56	-0,02	-0,07	0,57	0,61	0,04	-0,02	1,00	0,56	0,17	0,24	0,59	-0,08
Magnesio	0,92	0,88	0,96	0,22	0,75	0,02	0,02	0,90	0,94	-0,03	0,05	0,56	1,00	0,19	0,15	0,79	0,00
Nitrito	0,21	0,19	0,23	0,43	0,23	0,11	0,13	0,24	0,21	-0,10	-0,08	0,17	0,19	1,00	0,06	0,18	-0,06
PH	0,14	0,02	0,20	-0,04	0,36	0,12	-0,10	0,22	0,17	-0,05	-0,19	0,24	0,15	0,06	1,00	0,11	-0,20
Sulfato	0,81	0,80	0,78	0,27	0,66	-0,01	-0,02	0,76	0,82	0,01	0,02	0,59	0,79	0,18	0,11	1,00	-0,01
Turbidez	0,07	0,05	0,00	-0,04	-0,10	-0,18	-0,15	0,00	-0,01	0,54	0,63	-0,08	0,00	-0,06	-0,20	-0,01	1,00

Nota: O nível de significância para $\alpha=0,05$ e $n=940$ é **0,20**. Os valores em vermelho expressam uma correlação significativa entre o ferro e os parâmetros físico-químicos da água subterrânea. Fonte: O Autor.

É de conhecimento geral que a presença de ferro em teores elevados causa problemas de cor e turbidez na água. Embora os gráficos da figura 39 não tenham demonstrado nenhuma correlação entre o ferro e estas propriedades, as matrizes de correlação linear de Pearson e de Spearman mostraram significativa correlação. Entretanto, este fato não tem substancial importância físico-química para explicar a existência do ferro na água subterrânea, a não ser para questões de potabilidade da água distribuída.

Considerando que os dados analisados não são simétricos (gaussianos), a matriz de correlação Spearman mostrou-se mais significativa na identificação da relação entre o ferro versus cor (0,42) e ferro versus turbidez (0,63), do que a matriz de correlação Pearson: 0,32 e 0,49, respectivamente. As matrizes também revelaram a total ausência de correlação entre o íon ferro e os demais parâmetros investigados.

5.3.3 Análise multivariada

Os teores de ferro nas águas subterrâneas do Estado da Bahia e as notas de influência definidas para a litologia, o clima, a vegetação e o solo foram correlacionadas usando as análises estatísticas SPSS e de Componentes

Principais (PCA). Os resultados estão apresentados nas Tabelas 13 e 14, e nas Figuras 39 e 40, a seguir.

Tabela 13. Coeficientes obtidos da análise SPSS

Variável	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados	t	Sig	95% Intervalo de confiança para B	
	B	Erro padrão	Beta			Limite inferior	Limite superior
Constante	1,518	0,636	0,736	2,385	0,017	-2,767	-0,269
Litologia (pesos)	0,294	0,108	0,089	2,721	0,007	0,082	0,506
Solo (pesos)	0,068	0,093	0,024	0,730	0,466	-0,115	0,251
Clima (pesos)	0,467	0,127	0,119	3,667	0,001	0,217	0,718
Vegetação (pso)	0,267	0,100	0,089	2,669	0,008	0,071	0,464

Nota: significância $\leq 0,05$. Variáveis dependentes: rocha, solo, clima e vegetação. Fonte: O Autor.

O B0 é uma constante. Significa que a correlação das variáveis com o ferro no nível zero é de 1,518. B1 é o peso da variável 1 na influência dos teores de ferro na água quando as demais variáveis são iguais à zero. Beta é o coeficiente de correlação padronizado – geralmente o parâmetro utilizado na qualitativa é de 0,736. Quanto maior o valor de Beta, maior a influência da variável dependente sobre a variável independente. Assim, a partir de Beta, as variáveis mais influentes sobre as concentrações de ferro na água subterrâneas em ordem decrescente são: clima (0,119); litologia e vegetação (0,089) e solo (0,024). (t) é a estatística de teste t (*t- student*).

Note-se que o clima, a litologia e a vegetação apresentam significâncias abaixo de 0,05 (0,001, 0,007 e 0,008), respectivamente, rejeitando-se a hipótese nula, ou seja, existe significativa correlação entre estas variáveis e o ferro. O clima com significância de 0,001 é quem mais tende a influenciar nos teores de ferro das águas subterrâneas. Em seguida aparecem a litologia com significância de 0,007 e a vegetação com 0,008. O solo, por sua vez, apresenta significância de 0,466, bem superior ao limite de significância adotado no SPSS para esse estudo ($\leq 0,05$), aceitando-se a hipótese nula, ou seja, não existe significativa correlação entre o solo e o parâmetro ferro. Assim, os resultados observados no SPSS não indicaram haver correlação entre as notas atribuídas para o solo e as concentrações de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia; pelo menos

quando a análise dos dados é realizada em escala regional, como a utilizada neste estudo, sendo de baixa resolução devido às limitações dos mapas de solo existentes e fraca definição do exato tipo de solo na zona de influência do poço.

A Tabela 14 apresenta os resultados da análise dos componentes principais (PCA) para os dois primeiros PCs.

Tabela 14. Pesos das variáveis originais e as variâncias para cada um dos componentes para os dois primeiros PCs

VARIÁVEL	PC1	PC2
Litologia	-0,517039	+0,436799
Solo	-0,705927	-0,367475
Clima	-0,375172	+0,743056
Vegetação	-0,684151	-0,358408
Variância Total (%)	+34,36	+25,16
Variância acumulada (%)	+34,36	+59,52

Fonte: O Autor.

O PCA é uma transformação linear ortogonal que modifica os dados para um novo sistema de coordenadas. A maior variância por qualquer projeção dos dados fica ao longo da primeira coordenada (*primeiro componente - PC1*), a segunda maior variância fica ao longo da segunda coordenada (PC2), e assim por diante.

Verifica-se que as duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2) somadas apresentam 59,52% da variância total dos dados. O solo e a vegetação são as variáveis dominantes para o primeiro componente principal (PC1) com pesos de -0,705927 e -0,684151, respectivamente, enquanto que a litologia (-0,517039) e o clima (-0,375172) mostram valores mais baixos. A segunda componente principal (PC2) explica 34,36% da variância total. Examinando os valores de pesos das variáveis para a PC2, nota-se que o clima é a variável mais dominante (+0,743056), seguido pela litologia (+0,436799). As demais são fracas (-0,358408 e -0,367475), vegetação e solo, respectivamente.

A Figura 40 apresenta o gráfico de pesos para as duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2).

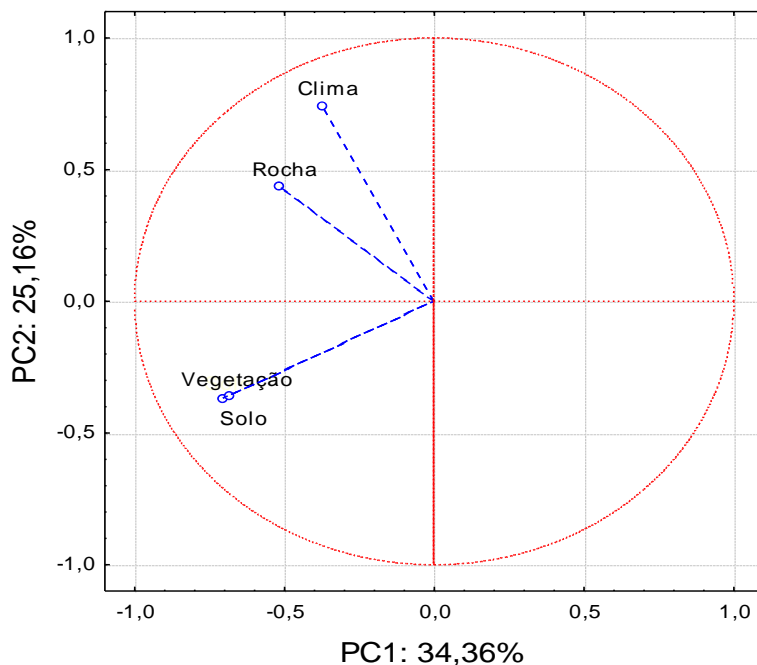


Figura 40. Gráfico de pesos da análise de componentes principais (PC1 X PC2). Fonte: O Autor

O gráfico de pesos mostra uma nítida separação entre as linhas que ligam os fatores clima e litologia (rocha) e uma forte aproximação entre as linhas que fixam os fatores vegetação e solo. Dessa forma, a vegetação e o solo exercem similar influência nos teores de ferro da água subterrânea no Estado da Bahia, enquanto o clima tende a influenciar mais que a litologia.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que o ferro encontra-se associado a todos os domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia. Dos poços tubulares profundos perfurados em cada domínio foram encontrados os seguintes percentuais de poços com ferro $>0,3$ mg/L: calcário (14,1%), cristalino (27,7%), sedimento (30,8%) e metassedimento (32,6%).

Os resultados das Matrizes de Correlação Linear de Pearson e de Spearman mostraram que somente as propriedades cor aparente e turbidez tiveram significativa correlação com os teores de ferro total encontrados nas águas subterrâneas do Estado da Bahia. Para os parâmetros avaliados: pH, alcalinidade total, sólidos totais dissolvidos, cálcio, magnésio, dureza total, cloreto, sulfato, fluoreto, condutividade elétrica, nitrito e nitrato, nenhuma correlação foi identificada. Como a correlação com a cor e turbidez não apresenta significativa importância do ponto de vista químico (somente estética), conclui-se que o ferro na água subterrânea não está associado à ocorrência de nenhum destes elementos químicos.

Os resultados obtidos do método estatístico SPSS indicaram o clima, a litologia e a vegetação como fatores naturais de significativa correlação com os teores de ferro encontrados nas águas subterrâneas da Bahia. Entretanto, não mostraram haver correlação entre as notas atribuídas ao solo e os altos valores de ferro encontrados nas amostras das águas subterrâneas investigadas. Isso se deve ao caráter regional da pesquisa, cujo mapa pedológico utilizado é de escala ao milionésimo, que não permite mostrar a grande variabilidade do solo, resultado da interação: clima-vegetação-litologia.

Já os dados avaliados a partir da técnica estatística PCA revelaram que os poços contendo altos teores de ferro sofrem maior influência do clima (+0,74) e da litologia (+0,44) na PC2, enquanto que, na PC1, prevalecem à influência do solo (-0,71) e da vegetação (-0,68).

Os resultados da pesquisa mostram que a existência de unidades litológicas potencialmente ricas em ferro em regiões de climas de baixa pluviometria não compromete a qualidade química da água subterrânea, por não

apresentar preponderantemente poços com alto teor de ferro. Foi constatada uma significativa diminuição no número de poços com alto teor de ferro no sentido de menor pluviometria (clima árido).

A pesquisa também conclui que a evolução dos teores de ferro na água subterrânea depende fundamentalmente da combinação de fatores naturais, com destaque para clima versus litologia.

Em função do caráter regional da pesquisa não foi possível avaliar a contribuição das profundidades de fraturamentos na evolução dos teores de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia. Neste caso, ocorreu a impossibilidade técnica de definir para os poços analisados que entrada de água tem maior ou menor parcela de contribuição nos teores de ferro, já que a água produzida de poço tubular profundo é resultante do somatório de todas as entradas de águas (aquíferos fissural e cárstico), ou de zonas filtrantes (aquífero poroso).

Este trabalho pode contribuir no desenvolvimento de projetos que visem melhor aproveitar os poços tubulares já perfurados, bem como intensificar os estudos hidrogeológicos visando a diminuir a perfuração de poços tubulares com teores de ferro fora do padrão de potabilidade, e assim, melhorar o atendimento com água de qualidade às comunidades do interior da Bahia.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Realizar pesquisas em escala de detalhe, em áreas pilotos, por domínio hidrogeológico, para melhor definição da influência do clima, da litologia, da vegetação, do solo e das profundidades de fraturamentos, na evolução dos teores de ferro das águas subterrâneas do Estado da Bahia.

Aprimorar os estudos hidrogeológicos e geofísicos com vista a diminuir a quantidade de poços com altos teores de ferro, especialmente quando o uso é destinado ao consumo humano.

Fortalecer os programas atualmente existentes de instalação de equipamentos para a remoção do excesso de ferro das águas dos poços paralisados e/ou abandonados em virtude dos altos teores.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de poço tubular profundo para captação de água subterrânea**. NBR 12212. Rio de Janeiro, 1992. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Construção de poço tubular profundo para captação de água subterrânea**. NBR 12244. Rio de Janeiro, 1992. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Material de revestimento: tubos de PVC para poços tubulares profundos**. NBR 13604/13605/13606/13607/13608. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Poços de monitoramento e amostragem**. NBR 13895. Rio de Janeiro, 1997. 21 p.

ANDRADE, J. B. M. **Fatores influentes no potencial e processos de salinização dos aquíferos fraturados do alto da bacia do rio Vaza-Barris, região de Uauá, Bahia, Brasil**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2010. 137 p.

BAHIA. Secretaria de Infraestrutura. Superintendência de Recursos Hídricos, **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. Salvador: Consórcio MAGNA-BRL, 2003. Tomo 1 e 2. CD-ROM.

BAHIA. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. **Geologia da Bahia: pesquisa e atualização**. Salvador: CBPM, 2012. v.1, 559 p. (Série publicações especiais,13)

BAHIA. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. Universidade Federal da Bahia. **Geologia da Bahia: pesquisa e atualização**, Salvador: CBPM. 2012. v. 2, 643 p. (Série publicações especiais, 13).

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 2004. 214 p.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. 2 v. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7 ed. São Paulo, 1989. 878 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. **Diário Oficial da União**. Brasília, 14 dez. 2011.

CARVALHO, A. R. Processo de complexação do ferro em águas subterrâneas: uma proposta de mudança da Portaria 36 do Ministério da Saúde. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS,13, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 13, p.1-18.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. **Atlas eletrônico dos recursos hídricos do Ceará**. Disponível em: <<http://atlas.srh.ce.gov.br>>. Acesso em: 14 mai. 2015.

CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E.; EATON, A. D. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20 ed. Washington, DC: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 1998. 1325 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Disponível em: <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 31 mar. 2015.

COMPANHIA DE ENGENHARIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS DA BAHIA. Divisão de Cadastro Hidrogeológico. **Cadastro de poços tubulares do Estado da Bahia**. Salvador, 2014.

COSTA, W. D. Avaliação de Reservas, **Potencialidade e Disponibilidade de Aquíferos**. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas – ABAS. Anais. São Paulo, 1998.

COSTA, W. D. Hidrogeologia dos meios fissurados. In: FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Coord). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3 ed. revisada e ampliada. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID, UFPE, 2008. p.121-151.

COSTA FILHO, W. D. **Locação de poços em rochas cristalinas: manual prático de orientação**. Fortaleza: ABAS; SEBRAE-CE, 2000. 40 p.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. Barcelona: Ed. Omega, 2 v. 1983. 2359 p.

DEVLIN, T. M. **Manual de bioquímica com correlações clínicas**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1998. 1007 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos: RIMA, 2005. 2 v.

DI BERNARDO, L. **Coagulação-floculação**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo, 1992. 129 p.

DINIZ, H. N.; MONTEIRO, J. L. et al. Histórico da perfuração de poços tubulares profundos e hidrodinâmica dos aquíferos, no município de São José dos Campos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2004. 23 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. Paraná, 2011. 67 p.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Coords.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391 p.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Eds.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM. Fortaleza, 1997. 389 p.

FENZL, N. **Introdução a hidrogeoquímica**. Belém: Universidade Federal do Pará, 1986. 189 p.

FREITAS, C. A.; Projeto piloto de Combate a ferro bactérias em poços tubulares no aquífero aluvionar de Amaro Lanari – Vale do Aço – MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12, 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABAS/DNPM/UFSC-PPGEA, 2002. CD-ROM.

GUERRA, A. M.; NEGRÃO F. I. Domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 9, 1996. **Anais...** Salvador: ABAS, 1996.

HACKETT, G.; LEHR, J. H. **Ferro-bactérias em poços artesianos: ocorrência, problemas e métodos de controle**. National Water Association, 1971. 1971, 65 p. (Caderno Técnico ABAS, v.1).

KATO, M. T. **Alcalinidade**. Roteiro de aula da disciplina Qualidade da Água, do Ar e do Solo. São Caetano do Sul: Escola de Engenharia Mauá, 1983.

KRAUSKOPF, K. B. **Introdução a geoquímica**. São Paulo: Polígono/EDUSP. 1972. 720 p.

LABORATÓRIO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA – LABDEA. Modelo de laudo de análise físico-químico. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2007.

LABORATÓRIO DE QUÍMICA DO SENAI-CETIND. Modelo de laudo de análise físico-químico. Salvador, 2007.

LANDGRAF, M. D.; MESSIAS, R. A.; REZENDE, M. O. O. **A importância ambiental da vermicompostagem: vantagens e aplicações**. São Carlos: RIMA, 2005. 106 p.

LEE, J. D. **Química inorgânica não tão concisa**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 527 p.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo. 2002. p.50-66.

LIMA, E. A.; BERALDO, V. J.; GUILERA, S. C.; BRANDÃO, L. C. R.; COSTA, E. A. Mapa de variação da qualidade das águas subterrâneas da região nordeste do Brasil para uso na irrigação. In: Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 2009. 13 p.

LIRA, S. A. **Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Métodos Numéricos em Engenharia dos Setores de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.196 p.

LOUGHNAN, F. C. **Chemical weathering of the silicate minerals**. New York: Elsevier, 1969. 154 p.

MACÊDO, J. A. **Águas e águas**. São Paulo, 2001. 505 p.

MACHADO, J. L. F. **Arqueologia geológica: as escavações e perfurações no subsolo através dos tempos**. CPRM; Serviço Geológico do Brasil. 2005. 10 p. (Inédito)

MADEIRA, V. S. **Desenvolvimento de um carvão adsorvente para remoção de íons ferro em águas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2003. 89 p.

MAHAN, B. M. **Química**: curso universitário. 4 ed. revisada. São Paulo: Blucher; Centro de Estudos Superiores, 2000.

MENESES, M. A. S. **Ferro-bactérias em água subterrânea, estudo de casos no Ceará**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. **Oxidação e remoção de ferro e manganês em águas para fins de abastecimento público ou industrial: uma abordagem geral**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 4, n. 1, p.29-43, 2012.

NASCIMENTO, S. A. de M. **Diagnóstico hidrogeológico, hidroquímico e da qualidade da água do aquífero freático do alto cristalino de Salvador-Bahia**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2008. 194 p.

NEGRÃO, F. I. **Caracterização hidroquímica e vulnerabilidade do sistema hidrogeológico cárstico da região de Irecê-Bahia**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987. 95 p.

NEGRÃO F. I. **Hidrogeologia do Estado da Bahia: qualidade, potencialidade, disponibilidade, vulnerabilidade e grau de poluição**. Tese de Doutorado, Instituto Universitário de Xeoloxía Isidro Parga Pondal da Universidade da Coruña, Espanha, 2008. 186 p.

NEVES, M. A.; MORALES, N. Fatores que influenciam a produtividade dos poços nas rochas cristalinas da Bacia do rio Jundiá (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14, 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABAS, 2006. 17 p.

OLIVEIRA, I. B.; NEGRÃO, F. I.; SIVA, A. G. L. S. Mapeamento dos aquíferos do Estado da Bahia utilizando o índice de qualidade natural das águas subterrâneas – IQNEAS. **Águas Subterrâneas**, v. 21, n. 1, p.123-137, 2007.

OLIVEIRA, D. A.; SCHMIDT, G.; MACEDO DE FREITAS, D. Avaliação do teor de ferro em águas subterrâneas de alguns poços tubulares, no plano diretor de Palmas. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 29, 2004, San Juan. **Anais...** San Juan, 2004. p.1-15.

ORSATI, W. A.; FILHO, A. C.; NETO, C. B. Manutenção de poços tubulares profundos. In: ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES. 1997, Ribeirão Preto (SP). **Anais...** ABAS. Ribeirão Preto (SP), 1997. p.95-104.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos (SP), 2001. 216 p.

PICCIN, J. S.; RISSINI, A. L.; FREDDI, J. J.; KOCH, M. M.; BRIÃO, V. B.; HEMKEMEIER, M. Otimização de sistema de autoaspiração de ar tipo Venturi para tratamento de água ferruginosa. **Rev. Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 14, n. 5, p.531-537, 2010.

PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E. Bacias hidrográficas: integração entre meio ambiente e desenvolvimento. **Ciência Hoje**, São Carlos, v. 19, n. 10, p.4-45, 1995.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005. 285 p.

PORPINO, K. K. P. **Biossorção de ferro (II) por casca de caranguejo**. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Departamento de Química da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2009. 89 p.

REBOUÇAS, A. C., BRAGA, B. & TUNDISI, J. G. **Águas doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2 ed. revisada e ampliada, São Paulo, 2002. 703 p.

RICHTER, C.A.; NETTO J. M. A. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991. 332 p.

RIZZI, N. E. Função da floresta na manutenção da qualidade da água para uso humano. **Revista Floresta**, v. 15, n. 12, p.54-65, 1985.

SALAMUNI, E. **Geologia estrutural: fraturas: juntas e falhas**. Aulas 5. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015. 63 p. Disponível em:<www.geologia.ufpr.br/graduacao2/estrutural/Aula5FRATURAS.pdf>. Acesso em 24 ago. 2015.

SCHOELLER, H. **Les eaux souterraines**. Paris: Mason, 1962. 642 p.

SCOPEL, R. M.; TEIXEIRA, E. C.; BINOTTO, R. B. Caracterização hidroquímica de água subterrânea em área de influência de futuras instalações de usinas hidrelétricas – Bacia hidrográfica do Rio Taquarintas/RS, Brasil. **Revista Química**. São Paulo: Nova. v. 28, n. 3, 2005. p.383-392.

SILVA, K. F. N. L.; SILVA, T. S.; CARVALHO, C. M. **Caracterização bacteriológica, hidroquímica e físico-química das águas subterrâneas das comunidades de Km 60 e Sucupira na Chapada do Apodi Limoeiro do Norte – Ceará**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2010, São Luís. **Anais...** São Luís, ABAS. 2010. 19 p.

SIQUEIRA, L. F. S.; ROJAS, M. O. A. I.; COSTA NETO, J. de J. G. Determinação espectrométrica de ferro (II) pelo sistema Fe (II)/KSCN em água do mar da praia do Calhau, São Luís, Maranhão (Brasil). **Revista ACTA Tecnológica – Revista Científica**, v. 6, n. 1, 2011. 34 p.

STAHL, N. S. P. **Influência do uso de carvão ativado em pó no pré-tratamento de águas de abastecimento**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Campinas. Campinas. 1996. 161 p.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. DC: American Public Health Association, 20th Edition. Washington, 1998.

STEPEHN, S. D. F.; HIRATA, R. C.; ROCHA, G. A. **Riscos de poluição de águas subterrâneas; uma proposta de avaliação regional**. São Paulo: ABAS. São Paulo, 1988. 10 p.

STRAKNOV, N. M. **Principles of lithogenesis**. Oliver and Boyd, v.1. Edinburgh, 1967. 245 p. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/cap3>>. Acesso em: 10 jun. 2015.

SZIKSZAY, M. Geoquímica das águas. **Boletim IG/USP**, n.5, São Paulo, 1993. 166 p. (Série didática)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL-UFRGS. **Apostila: gênese e classificação do solo**. Capítulo 1. p.1-86. Disponível em: <<https://chasqueweb.ufrgs.br>>. Acesso em: 13 ago. 2015.

VERAS, L. R. V.; DI BERNARDO, L. Tratamento de água de abastecimento por meio de tecnologia de filtração em múltiplas etapas – FIME. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.13, n.1, 2008. p.109-116.

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C.; VIEIRA, M. N. S. **Solos: propriedade, classificação e manejo**. Brasília: MEC/ABEAS. 1988. 154 p. (Programa Agricultura nos Trópicos, v.2).

YAMAN, M.; KAYA, G. **Speciation of iron (II) and (III) by using solvent extraction and flame atomic absorption spectrometry**. Papers Presented at the Analytical Forum Analytical Forum 2004 SI. *Analytica Chimica Acta*.v.540, n.1. 2004. p.77-81.

WELZ, B.; HOSTEN. **Atomic absorption spectrometry**. 3 ed. Wiley-VCH, 1999.

WONG, J. M. Chlorination-filtration for iron and manganese removal. In: **Journal AWWA. Research & Technology**, 1984.P.76-79.

ZIMBRES, E. **Química das águas**. Universidade Estadual do Rio de Janeiro/RJ, 2002. Disponível em: <www.meioambiente.pro.br/agua/quimica.htm>. Acesso em: 28 jun. 2014.